

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
MESSAOUD BERNIA

STRATÉGIES DE RÉPARTITION DES CHARGES DANS LES SYSTÈMES
ÉLECTROMÉCANIQUES COUPLÉS

SEPTEMBRE 2015

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Résumé

Les systèmes multimoteurs et multisources d'énergie sont connus dans la pratique dans divers domaines, par exemple dans les robots, les appareils de manutention, les systèmes d'alimentation, l'industrie du papier, du textile, la traction ferroviaire et deviennent de plus en plus importants avec la prolifération des véhicules électriques et hybrides et l'établissement du procédé de l'alimentation distribuée. L'objectif principal de ce travail est l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les entraînements électriques en faisant recours aux systèmes multimoteurs tout en cherchant des stratégies efficaces, voire optimales, pour la gestion de l'énergie.

L'établissement d'une stratégie efficace de répartition dans le but de réduire par la suite la consommation d'énergie du système au complet requiert une modélisation détaillée du système d'entraînement incluant la charge inertielle, et une loi de commande assez robuste afin de pouvoir manipuler les perturbations multiples dans les systèmes flexiblement ou rigidement couplés.

Afin d'assurer une efficacité maximale, des techniques basées sur l'intelligence artificielle (logique floue, algorithmes génétiques) sont introduites et adaptées selon le cahier des charges.

Table des matières

Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des tableaux.....	viii
Liste des figures	ix
Chapitre 1 - Introduction.....	1
1.1 Problématique de la répartition des charges dans les systèmes électromécaniques couplés	1
1.2 Objectifs	3
1.3 Méthodologie.....	4
1.4 Structure du mémoire	6
Chapitre 2 - Modélisation d'un système électromécanique couplé	8
2.1 Description de la machine synchrone à aimants permanents	8
2.2 Hypothèses simplificatrices.....	11
2.3 Modélisation mathématique de la machine synchrone à aimants permanents.....	12
2.3.1 Équations électriques	12

2.3.2	Transformation de Park	13
2.4	Modélisation de l'onduleur de tension	15
2.5	Modélisation du couplage physique dans les systèmes multimoteurs	17
2.5.1	Modélisation du couplage flexible.....	17
2.5.2	Modélisation du couplage rigide.....	19
2.6	Modélisation de la charge inertielle	20
2.6.1	Modèle mathématique de la charge inertielle (lien flexible)	20
2.6.2	Sélection et dimensionnement de la charge	22
2.7	Calcul du bilan énergétique du système d'entraînement multimachine.....	24
2.7.1	Calcul du rendement	24
2.7.2	Modélisation des pertes dans le système	25
2.8	Conclusion.....	27
Chapitre 3 - Répartition des charges à base des techniques de l'allocation		
	dynamique du contrôle	28
3.1	Répartition des charges à base de la technique pseudo inverse	30
3.1.1	Tests et simulations.....	32
3.1.2	Résultats des simulations	34
3.2	Répartition des charges à base de la technique <i>Daisy Chain</i>	36
3.2.1	Principe de la technique Daisy Chain	37
3.2.2	Tests et simulations.....	37

3.2.3 Résultats des simulations	38
3.3 Discussion des résultats des simulations	40
3.4 Évaluation des performances des deux techniques de répartition	41
3.5 Conclusion.....	43
Chapitre 4 - Stratégies de la répartition des charges	44
4.1 Répartition des charges à base de la logique floue.....	44
4.1.1 Principe de la logique floue [34].....	45
4.1.2 Stratégie floue de la répartition des forces.....	47
4.1.3 Tests et simulations.....	50
4.1.4 Discussion	53
4.2 Algorithme de répartition des charges.....	55
4.2.1 Tests et simulations.....	56
4.2.2 Résultats des simulations	56
4.2.3 Discussion	59
4.3 Répartition des forces dans un système multimoteur avec la charge placée au milieu des moteurs d'entraînement	59
4.3.1 Tests et simulations.....	60
4.3.2 Résultats des simulations	61
4.3.3 Discussion	62
4.4 Conclusion.....	63

Chapitre 5 - Répartition de la puissance à base de la technique de commande

Direct Power Control (DPC) et optimisation avec les algorithmes

génétiques	64
5.1 Répartition des puissances dans les systèmes multimoteurs	65
5.1.1 Principe de la Commande directe de la puissance du moteur asynchrone	65
5.1.2 Estimation du couple électromagnétique et du flux de la machine	65
5.1.3 Structure du contrôle	66
5.1.4 Tests et simulations	67
5.1.5 Résultats es simulations	68
5.1.6 Discussion	71
5.2 Optimisation des régulateurs et répartition de la charge par les algorithmes génétiques	72
5.2.1 Optimisation des paramètres des régulateurs par les algorithmes génétiques	72
A. Tests et simulations	73
B. Résultats des simulations	74
C. Discussion	75
5.2.2 Répartition des charges à base des algorithmes génétiques	76
A. Tests et simulations	76

B.	Résultats des simulations	77
C.	Interprétation.....	78
5.3	Conclusion.....	79
Chapitre 6 - Conclusion générale et recommandations		80
Références.....		83
Annexe A – Articles scientifiques		87

Liste des tableaux

Tableau 3-1	Paramètres des moteurs	33
Tableau 4-2	Règles floues pour T_{tot} est S	49
Tableau 4-2	Règles floues pour T_{tot} est M	49
Tableau 4-3	Règles floues pour T_{tot} est L	49
Tableau 4-4	Paramètres des moteurs	51
Tableau 5-1	Table de commande	67
Tableau 5-2	Paramètres des moteurs pour la répartition avec DPC	68

Liste des figures

Figure 2-1. Types des MSAP selon l'aimant	9
Figure 2-2. Configurations les plus courantes des rotors des MSAP	11
Figure 2-3. Représentation des enroulements de la MSAP dans l'espace électrique	12
Figure 2-4. Circuit équivalent de la MSAP	14
Figure 2-5. Schéma de l'onduleur de tension triphasé	16
Figure 2-6. Schéma équivalent de la charge inertielle	21
Figure 2-7. Profil de charge imposé par la pompe centrifuge	24
Figure 2-8. Flux d'énergie dans le système	26
Figure 3-1. Principe de l'allocation du contrôle	29
Figure 3-2. Puissances	34
Figure 3-3. Courants i_q	34
Figure 3-4. Courants i_d	34
Figure 3-5. Tensions v_q	35
Figure 3-6. Tensions v_d	35
Figure 3-7. Caractéristiques des couples	35
Figure 3-8. Couples de référence	35
Figure 3-9. Vitesses de rotation des moteurs	35
Figure 3-10. Vitesse de rotation de la charge	35
Figure 3-11. Schéma de principe de la technique Daisy Chain	37
Figure 3-12. Courants i_d	38
Figure 3-13. Courants i_q	38
Figure 3-14. Tensions v_q	39
Figure 3-15. Tensions v_d	39
Figure 3-16. Caractéristiques des couples	39
Figure 3-17. Couples de référence	39
Figure 3-18. Vitesses de rotation des moteurs	39

Figure 3-19. Coefficients de répartition	39
Figure 3-20. Vitesse de rotation de la charge	40
Figure 3-21. Pertes totales	42
Figure 3-22. Pertes (Daisy Chain)	42
Figure 3-23. Pertes (Pseudo inverse)	42
Figure 3-24. Rendement global	42
Figure 3-25. Puissance électrique	43
Figure 3-26. Puissance absorbée	43
Figure 4-1. Schéma bloc du système d'entraînement avec la technique proposée	48
Figure 4-3. Fonctions d'appartenance	50
Figure 4-4. Caractéristique de la vitesse (S1)	51
Figure 4-5. Caractéristique des vitesses (S2)	51
Figure 4-6. Caractéristiques des couples	52
Figure 4-7. Coefficients de répartition	52
Figure 4-8. Courants i_q	52
Figure 4-9. Courants i_d	52
Figure 4-10. Pertes totales	52
Figure 4-11. Énergie consommée	52
Figure 4-12. Rendements	53
Figure 4-14. Couple de charge	53
Figure 4-15. Puissance électrique	53
Figure 4-16. Schéma bloc du système d'entraînement avec la technique proposée	56
Figure 4-17. Puissance électrique	56
Figure 4-18. Tensions v_d	57
Figure 4-19. Tensions v_q	57
Figure 4-20. Courants i_d	57
Figure 4-21. Courants i_q	57
Figure 4-22. Caractéristiques des couples	58
Figure 4-23. Coefficients de répartition	58
Figure 4-24. Profil de charge	58
Figure 4-25. Caractéristique de la vitesse	58
Figure 4-26. Rendements	58

Figure 4-27. Pertes totales	58
Figure 4-28. Modèle physique d'un axe de pivotement rotatif	60
Figure 4-29. Schéma explicite de la topologie proposée	60
Figure 4-30. Caractéristiques des couples	61
Figure 4-31. Couple de charge	61
Figure 4-32. Caractéristique de la vitesse(S2)	61
Figure 4-33. Courants i_d	62
Figure 4-34. Courants i_q	62
Figure 4-35. Pertes totales	62
Figure 4-36. Rendement	62
Figure 5-1. Tension v_a	68
Figure 5-2. Tension v_b	68
Figure 5-3. Tension v_c	69
Figure 5-4. Courant i_a	69
Figure 5-5. Courants i_d	69
Figure 5-6. Courants i_q	69
Figure 5-7. Vecteur du flux statorique (M1)	70
Figure 5-8. Vecteur du flux statorique (M2)	70
Figure 5-9. Vecteur du flux statorique (M3)	70
Figure 5-10. Caractéristiques des couples	70
Figure 5-11. Puissances utiles	71
Figure 5-12. Vitesse de la charge	71
Figure 5-13. Courant i_a (M1)	74
Figure 5-14. Courant i_a (M2)	74
Figure 5-15. Caractéristique du couple (M1)	74
Figure 5-16. Caractéristique du couple (M2)	74
Figure 5-17. Puissance absorbée	75
Figure 5-18. Pertes totales	75
Figure 5-19. Énergie consommée	75
Figure 5-20. Caractéristiques des couples	77
Figure 5-21. Pertes totales	77

Figure 5-22. Puissances électriques	77
Figure 5-23. Puissances absorbées	77
Figure 5-24. Énergie consommée	78

Chapitre 1 - Introduction

1.1 Problématique de la répartition des charges dans les systèmes électromécaniques couplés

L'efficacité énergétique demeure l'objectif majeur de l'industrie moderne, étant donné qu'un grand pourcentage des entraînements est à base de moteurs électriques, et qu'un moteur électrique moyen consomme son prix à l'achat en énergie en moins de deux mois. Cependant une optimisation de son efficacité énergétique rapporte de considérables gains le long de sa durée de vie. Pour ce faire, diverses techniques et stratégies sont développées afin d'optimiser leur fonctionnement en les maintenant le plus possible dans une plage nominale (optimale). C'est à partir de cette problématique que nous investiguons l'utilité du remplacement de quelques systèmes d'entraînement monomachines par des entraînements multimachines multiconvertisseurs; ces derniers peuvent apporter une contribution considérable en matière de l'efficacité énergétique et de la maximisation de la durée de vie de l'équipement seulement s'ils sont accompagnés par une stratégie efficace de répartition des efforts.

La répartition des charges mécaniques, autrement dit; l'utilisation de multiples moteurs entraînant une charge commune directement ou indirectement, est une pratique commune dans les systèmes qui emploient les convoyeurs [1] [2]. Dans ce type d'applications, l'utilisation des moteurs non-colocalisés permet de réduire la tension dans la courroie par le contrôle approprié des moteurs, avec la nécessité de prendre en considération la flexibilité

de la courroie et les effets de résonances possibles. Avec les moteurs colocalisés, la gestion de la répartition des charges doit être obtenue pour éviter la surchauffe de l'un des moteurs. Les deux cas peuvent être considérés comme des problèmes de répartition des charges avec un degré variable de conformité dans le but de minimiser la tension dans la courroie ou dans le système de transmission.

Ce type de problème de répartition des charges surgit maintenant dans beaucoup d'applications en utilisant un couplage rigide (les laminoirs, les excavateurs utilisés dans les mines à ciel ouvert, l'industrie du papier, robots, véhicules électriques et hybrides) [3] [4] ou un couplage flexible (les moteurs d'entrainements couplés à l'aide des arbres, des chaînes ou des ceintures d'accouplement extrêmement longues, où le vrillage et l'élongation deviennent significatifs, et conduit vers des applications où la résilience vient de la charge, par exemple dans les bobineuses utilisées dans l'industrie du papier, plastique, métal, etc.) [3] [5] [6] où l'utilisation des systèmes multimoteurs est dictée par des raisons techniques et économiques. Nous notons que seulement quelques commandes de systèmes multimoteurs peuvent économiser l'énergie, c.-à-d. réduire au minimum l'énergie consommée par le système au complet.

D'un point de vue pratique, des structures de répartition des charges ont été proposées, tels que : arbre virtuel d'interconnexion (liaison électronique), structure maître-esclave, et d'autres méthodes et techniques de contrôle et de partage dans [7, 8] .

Chaque méthode possède ses propres avantages et le choix est souvent en fonction de l'application, et dépend du type d'accouplements. Cependant, l'aspect énergétique des stratégies proposées dans la littérature fut rarement inspecté, pour ce fait ce projet vient porter une contribution en quelques points majeurs :

- La manipulation des objectifs et des perturbations multiples dans les systèmes modulaires et étroitement couplés pour obtenir des structures de gestion pratiques, ce qui est un défi pour l'ingénierie surtout en ce qui concerne les applications qui impliquent des responsabilités critiques.
- Pour réduire des contraintes dans le système, pour répondre à des exigences de classement par taille de moteur et pour réduire par la suite la consommation d'énergie du système au complet dans diverses applications où les moteurs doivent partager une charge commune, par un accouplement rigide ou flexible.
- L'association des sources d'énergie multiples ou des moteurs sur une charge commune soulève des problèmes de stabilité. Répondre à des objectifs multiples dans les systèmes dynamiques à couplage intermédiaire pour obtenir des structures de gestion pratiques qui répondent aux exigences en mesure d'économie d'énergie constitue un défi dans la recherche.

1.2 Objectifs

L'objectif majeur de ce travail est d'offrir un moyen pour l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les entraînements électriques en proposant une alternative par les systèmes multimoteurs accompagnés d'une stratégie de répartition conçue pour qu'elle soit simple à implémenter, efficace en matière d'économie d'énergie et puisse facilement être adaptée et ensuite appliquée sur divers systèmes. Cela passe par :

- contribuer à l'élaboration de méthodes de contrôle et de stratégies basées sur la caractérisation énergétique des systèmes électromécaniques pour améliorer leurs performances globales.

- concevoir des stratégies pour les problèmes de partage de charge dans les systèmes multimoteurs avec couplage rigide et flexible prenant compte du rejet de perturbations de tension et de critères de stabilité interne, en particulier dans le contexte de l'optimisation de l'efficacité énergétique.

1.3 Méthodologie

Établir des stratégies de répartition des charges dans le but d'optimiser la consommation de l'énergie et l'efficacité du système d'entraînement révèle divers contraintes et fait émerger plusieurs facteurs. De nos jours les degrés d'efficacité des moteurs électriques sont déjà élevés ce qui rend difficile l'exploitation de ce point. Cependant la diminution des pertes, surtout celles en puissance, permet d'obtenir d'excellents résultats. La plage dans laquelle le moteur fonctionne est d'une grande importance aussi. La première étape de ce travail est une recherche bibliographique approfondie dans le champ de recherche afin de mettre le point sur ce qui a été fait dans le domaine, ce qui nous a permis par la suite d'apporter nos contributions.

L'unité principale dans un banc d'entraînement multimachine est le moteur électrique, et donc donner de l'importance au choix du type de ce dernier est une étape primordiale si on veut apporter des gains en matière de l'efficacité énergétique. Le choix est tombé sur les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) grâce à leurs multiples avantages : couple massique, efficacité grâce à la réduction des pertes rotoriques, haute densité de puissance, et aptitude à fonctionner à hautes vitesses, ce qui rend possible l'élimination des éléments de transmission mécanique.

Une modélisation complète d'un système d'entraînement monomachine en premier lieu et multimachine par la suite est nécessaire afin de pouvoir inspecter et prouver les avantages tirés par les stratégies proposées. La modélisation sera développée dans l'environnement Matlab-Simulink et inclut celle des moteurs, convertisseurs et des deux différents types de couplage : flexible et rigide, les systèmes proposés sont composés de machines non-identiques afin de donner une certaine complexité et voir à quel point on serait en mesure de maîtriser les complications engendrées par un tel choix.

La conception d'une loi de commande pour un système multimachine est une étape sensible vue sa complexité [9], ce qui rend la conception des différents régulateurs délicate. La technique de commande FOC (Commande à flux orienté – *Field Oriented Control*) sera utilisée en premier lieu pour le design de la loi de commande. On se penchera ensuite sur la conception des stratégies de répartition des forces tout en commençant par les techniques de l'allocation de la commande (*control allocation*) et cela pour différentes topologies selon le nombre des moteurs d'entraînement et la position de la charge par rapport à ces derniers, pour faire une évaluation des performances de chacune.

Afin d'obtenir des résultats crédibles en matière de l'étude du bilan énergétique et l'efficacité de chacune des méthodes, une prise en considération des différentes pertes dans le système (pertes fer, joule, mécanique, et dans les convertisseurs) est nécessaire, ainsi qu'une modélisation d'une charge inertielle et l'imposition d'un profil de charge dynamique et non linéaire pour s'approcher des conditions réelles.

Nous aurons également recours aux techniques de l'intelligence artificielle pour concevoir une stratégie adaptative de répartition des charges à base de la logique floue et

l'utilisation des algorithmes génétiques pour l'optimisation des régulateurs dans le but de minimiser la consommation en énergie.

1.4 Structure du mémoire

Il est proposé de concevoir des stratégies de répartition des charges pour des systèmes électromécaniques couplés dans le but de l'amélioration de l'efficacité énergétiques des entraînements électriques.

Ce mémoire est organisé de la manière suivante.

Le chapitre II présente une modélisation complète du système d'entraînement multimachine dans l'environnement Matlab-Simulink, incluant la modélisation de la MSAP (*Machine synchrone à aimants permanents*), de l'onduleur, des couplages flexibles et rigides, de la charge inertielle, et le tracé d'un profil de charge pratique et non linéaire d'une pompe centrifuge. Une modélisation des différentes pertes dans le système ainsi que la méthode de calcul de l'efficacité s'imposent à la fin de ce chapitre.

Le chapitre III traite la problématique de la répartition des charges dans les systèmes multimoteurs comme étant un problème d'allocation de la commande dans les systèmes sur-actionnés. On établira dans ce chapitre deux stratégies de répartition basées sur deux techniques : pseudo inverse et *daisy chain*, dans le but de faire une évaluation des performances et des bilans énergétiques des deux méthodes.

Le chapitre IV présente des stratégies de répartition des charges conçues dans le but d'optimiser l'énergie consommée par un système d'entraînement multimachine et assurer un fonctionnement dans le régime nominal des moteurs. On présentera une stratégie de répartition à base de la logique floue. Les performances de cette stratégie seront comparées

à celle d'une répartition égale. La dernière rubrique de ce chapitre sera consacrée à la présentation d'une topologie différente d'un système multimoteur où la charge est positionnée au milieu des moteurs d'entraînement.

Le chapitre V sera partagé en deux axes. L'un consiste à la conception d'une loi de commande habituellement utilisée pour contrôler les génératrices qui est la *Direct Power Control* (DPC). Contrôler la puissance utile de chaque moteur nous permet de faire une répartition de la puissance requise par la charge, et non du couple requis, ce qui est le cas dans les chapitres III et IV. L'autre axe est dédié à la présentation d'un algorithme génétique conçu dans le but d'optimiser les paramètres des différents régulateurs utilisés dans la loi de commande. L'optimisation porte, en plus d'un critère ITAE (Time Multiplied by Absolute Error), sur un critère de minimisation de l'énergie consommée. Par la suite on utilise un algorithme génétique qui permet de générer les couples électromagnétiques de référence optimaux des moteurs.

Le chapitre VI consiste en une discussion des résultats, une évaluation de la contribution apportée par ce travail de recherche, la proposition des recommandations pour les travaux ultérieurs, et une conclusion générale pour clôturer ce mémoire de maîtrise.

Chapitre 2 - Modélisation d'un système électromécanique couplé

L'étape de base de ce projet est la modélisation complète d'un système d'entraînement multimachine/multiconvertisseur. Modéliser un système dynamique et non linéaire est un procédé qui consiste à décrire son comportement et sa dynamique par des équations mathématiques tout en introduisant des hypothèses simplificatrices.

2.1 Description de la machine synchrone à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une machine à courant alternatif. Du coup, elle possède la même structure fondamentale que toute autre machine électrique: un stator et un rotor. Ce dernier présente la distinction de la MSAP par rapport aux autres machines car il est constitué d'aimants permanents d'où l'appellation de la machine. Quant au stator, il est identique à celui des machines synchrones.

- Le stator

Le stator est spécifié par trois bobinages indépendants constitués d'un nombre bien défini de bobines réparties dans des encoches. Ces bobines, une fois alimentées par un réseau de tensions ou de courants triphasés, créent un champ magnétique tournant [stator-rotor]. On note que les trois enroulements sont décalés de 120 degrés électriques dans l'espace. La vitesse de rotation du champ tournant est proportionnelle au nombre de pôles de la machine et à la pulsation des courants statoriques [10] :

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (2-1)$$

avec

ω : La pulsation des courants statoriques [rad/s].

p : Le nombre de paires de pôles de la machine.

Ω : vitesse de rotation de la machine [rad/s].

- Le rotor

La bobine d'excitation qui sert de rotor dans les moteurs synchrones est remplacée par des aimants permanents dans les MSAP, ce qui permet d'éliminer les pertes joules dans le rotor, et par conséquent un rendement plus élevé est obtenu pour ce genre de machine. En plus de la limitation des pertes joules dans le stator; un bon rapport couple/inertie est obtenu grâce à la compacité du rotor permettant des accélérations élevées. Le type d'aimants permanents présentés dans la figure 2-1 (a,b) conduit à deux types de MSAP; soit à pôles lisses ou à pôles saillants [11].

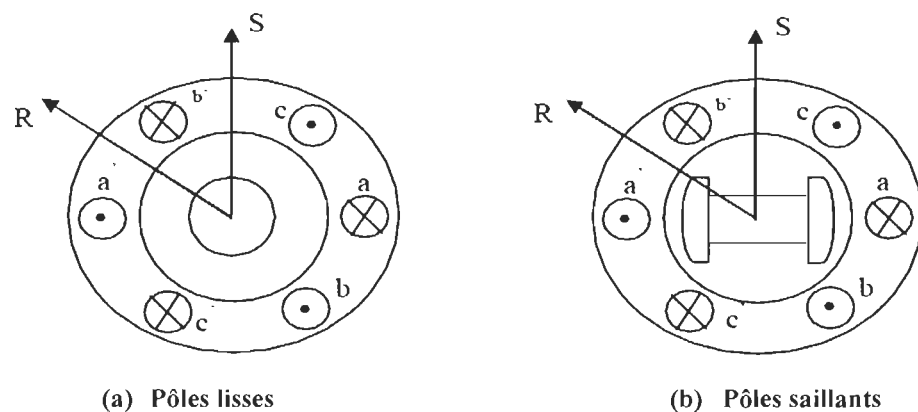
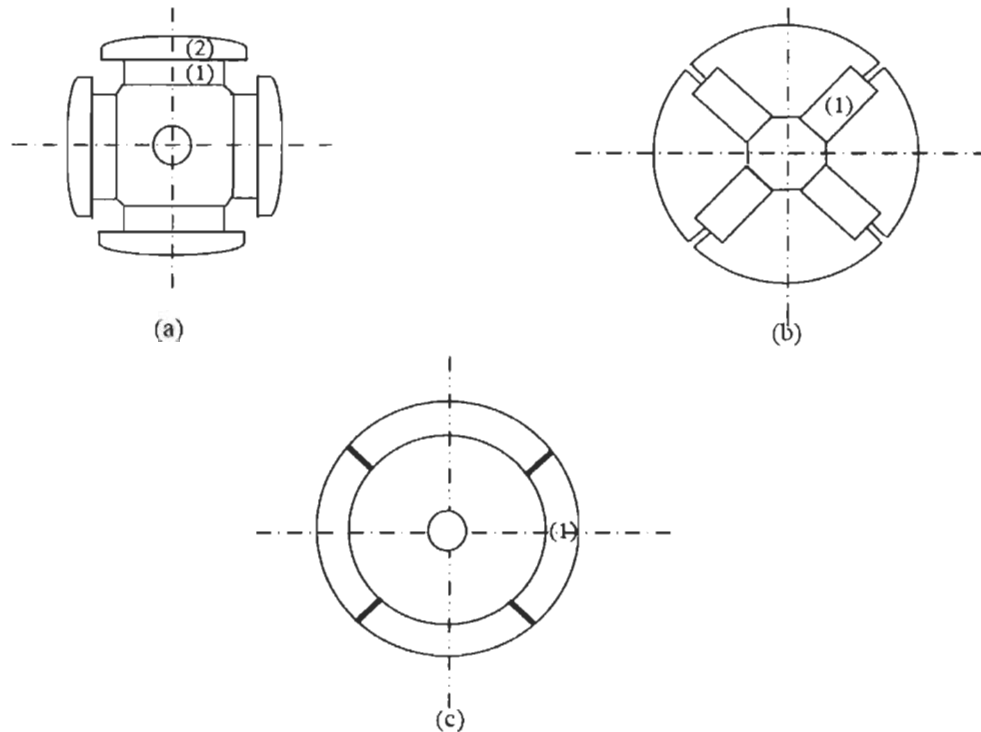


Figure 2-1 Types des MSAP selon l'aimant [12]

Le moteur synchrone à aimants permanents n'est pas limité à une gamme de puissances précise. On en trouve dans toutes les plages, et touche un nombre assez élevé d'applications industrielles. Au début, son usage fut limité dans des petites applications industrielles (p.ex. le matériel informatique). Il continue à gagner du terrain notamment dans des procédés qui nécessitent haute précision et fiabilité et qui exigent un couple élevé à petite vitesse, tels que l'industrie papetière, la propulsion marine [13], ainsi que dans d'autres systèmes comme dans la traction, les ventilateurs, les compresseurs et les ascenseurs [14].

Les machines synchrones à aimants permanents sont classées structurellement selon la disposition des aimants dans le rotor. La figure 2-2 [15, 16] illustre les topologies les plus courantes d'un rotor à quatre pôles :

- ✓ Structure du rotor à pôles saillants possédant des pièces polaires servant à la concentration du flux, figure 2-2.a.
- ✓ Structure à aimants enterrés; les aimants sont noyés dans le rotor et sont magnétisés tangentiellement, figure 2-2.b.
- ✓ Structure à aimants encastrés; où les aimants sont insérés à la surface du rotor, figure 2-2.c.



- (a) : aimants permanents (1) et pièces polaires saillantes (2)
 (b) : aimants permanents (1) noyés
 (c) : aimants permanents (1) distribués sur la surface du rotor

Figure 2-2 Configurations les plus courantes des rotors des MSAP [12]

2.2 Hypothèses simplificatrices

La modélisation de la machine synchrone à aimants permanents, comme celle de tout autre système dynamique, exige l'introduction de quelques hypothèses simplificatrices afin de diminuer la complexité de la tâche. Pour les MSAP on note quelques hypothèses telles que [17, 18]:

- l'entrefer est constant;
- le moteur n'est pas saturé;
- l'effet de la température sur les paramètres de la machine est négligeable;
- l'effet de peau est négligeable;
- l'armature est symétrique et non saturée;

- les inductances propre et mutuelle sont indépendantes des courants qui circulent dans les différents enroulements;
- les FEM sont à répartition sinusoïdale;
- les pertes fer et l'effet amortisseur sont négligés;
- la perméabilité des aimants est considérée comme voisine de celle de l'air;
- l'effet d'hystérésis et les courants de Foucault dans le stator sont négligeables.

2.3 Modélisation mathématique de la machine synchrone à aimants permanents

2.3.1 Équations électriques

Les équations électriques qui régissent le moteur synchrone à aimants permanents sont obtenues en appliquant la loi des mailles au modèle des enroulements de la machine triphasée dans l'espace électrique.

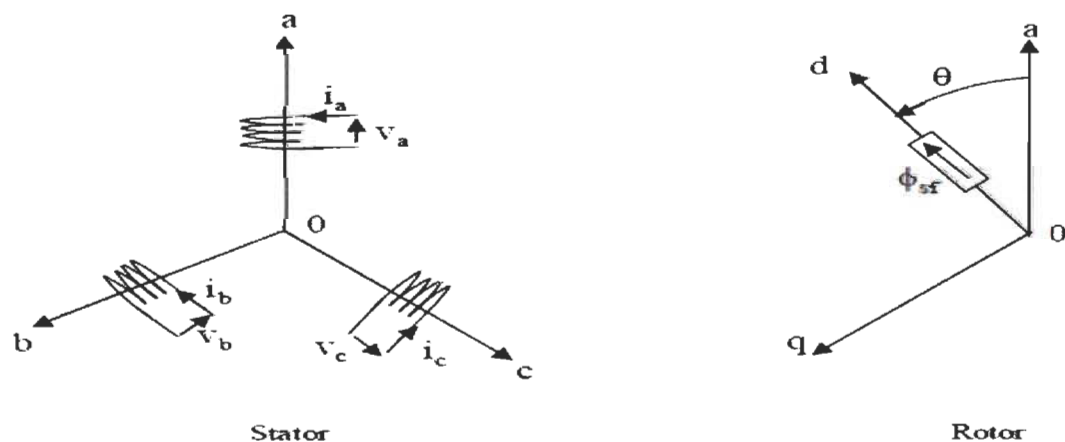


Figure 2-3 Représentation des enroulements de la MSAP dans l'espace électrique [11].

Dans un repère fixe au stator, les équations électriques de la machine synchrone à aimants permanents sont données en notation matricielle comme suit :

$$[V_s] = [R_s] [i_s] + \frac{d\phi_s}{dt} \quad (2-2)$$

$$\phi_s = [L_s] [i_s] + [\lambda] \quad (2-3)$$

Où λ est le flux magnétique permanent

avec

$$[V_s] = [V_a \quad V_b \quad V_c]^T : \text{Vecteur des tensions statoriques}$$

$$[i_s] = [i_a \quad i_b \quad i_c]^T : \text{Vecteur des courants statoriques}$$

$$[\phi_s] = [\phi_a \quad \phi_b \quad \phi_c]^T : \text{Vecteur des flux statoriques}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrice résistance du stator}$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} : \text{Matrice inductance du stator}$$

2.3.2 Transformation de Park

Un passage du repère triphasé au repère biphasé est requis pour que les algorithmes de commande traitent des grandeurs électriques continues. Par conséquent les enroulements triphasés (a, b, c) sont remplacés par deux enroulements en quadrature (d, q) [11]; le passage est atteint par la transformée de Park. La matrice de passage est donnée par :

$$p(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (2-4)$$

et la matrice $p^{-1}(\theta)$ pour le passage inverse est donnée par :

$$p^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) & 1 \\ \cos \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & -\sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) & 1 \end{bmatrix} \quad (2-5)$$

L'application de la transformation de Park mène à un modèle équivalent de la machine dont le circuit équivalent est illustré dans la figure 2-4.

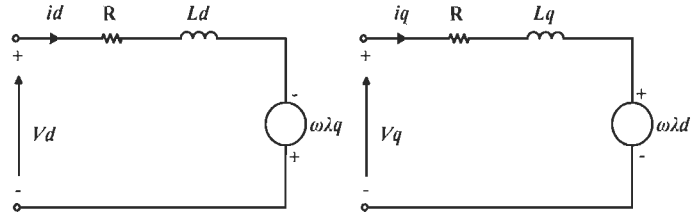


Figure 2-4 Circuit équivalent de la MSAP.

Les équations qui décrivent le comportement de la MSAP dans un repère lié au rotor sont:

$$V_d = R i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - L_q p \omega i_q \quad (2-6)$$

$$V_q = R i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + L_d p \omega i_d + p \lambda \omega \quad (2-7)$$

$$\tau = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q + \lambda i_q] \quad (2-8)$$

$$\frac{d}{dt} \omega = \frac{1}{J} (\tau - \tau_f - \tau_L) \quad (2-9)$$

où

V_d, V_q	Tensions dans l'axe d-q
i_d, i_q	Courants dans l'axe d-q
L_d, L_q	Inductances dans l'axe d-q
R	Résistance statorique
p	Nombre de paires de pôles
λ	Flux de l'aimant permanent
λ_d, λ_q	Flux dans l'axe d-q
τ	Couple électromagnétique
ω	Vitesse mécanique du rotor
J	Inertie
τ_f	Couple de frottement
τ_L	Couple de charge

2.4 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique qui assure la conversion d'une alimentation continue en alimentation alternative pour que la charge soit alimentée en courant alternatif [19]. Nous utilisons dans le cadre dans notre travail des onduleurs triphasés constitués de trois demi-ponts monophasés et donc six interrupteurs, figure 2-5 [20].

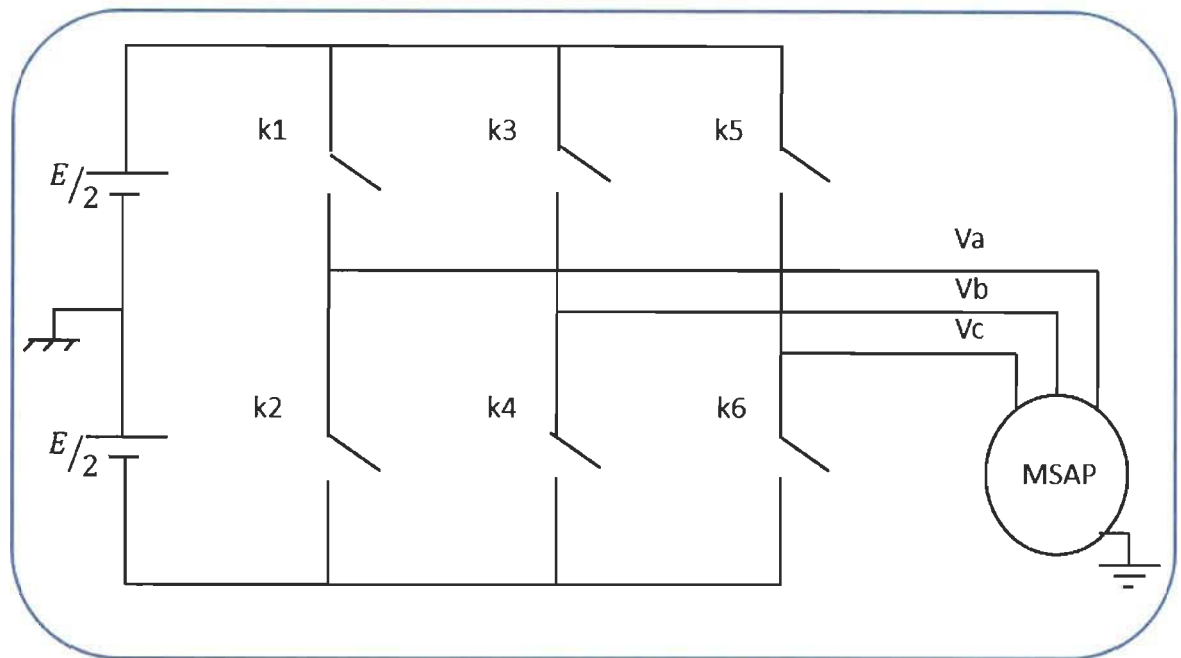


Figure 2-5 Schéma de l'onduleur de tension triphasé.

L'alimentation de l'onduleur est supposée parfaite, est divisée en deux sources connectées entre elles par un point milieu, et dont la force électromotrice de chacune est égale à $\frac{E}{2}$. La figure 2-5 indique que l'onduleur est à deux niveaux et est constitué de trois bras; chaque bras comprend deux transistors dont la commande logique est complémentaire [21]:

- si $S_I = 1$, l'interrupteur k_I est passant, et k_2 est ouvert;
- et si $S_I = 0$, l'interrupteur k_I est ouvert, et k_2 est passant.

Les tensions de lignes délivrées par l'onduleur sont :

$$E_a = V_a - V_b = E(S_a - S_b) \quad (2-10)$$

$$E_b = V_b - V_c = E(S_b - S_c) \quad (2-11)$$

$$E_c = V_c - V_a = E(S_c - S_a) \quad (2-12)$$

Les tensions V_a , V_b , V_c constituent un système équilibré, et donc on obtient :

$$V_a = \frac{E}{3}(2S_a - S_b - S_c) \quad (2-13)$$

$$V_b = \frac{E}{3}(2S_b - S_a - S_c) \quad (2-14)$$

$$V_c = \frac{E}{3}(2S_c - S_a - S_b) \quad (2-15)$$

et par conséquent le système prend la forme suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3}E \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

2.5 Modélisation du couplage physique dans les systèmes multimoteurs

Les entraînements utilisant un arbre mécanique, un accouplement flexible, ou une chaîne sont communs dans l'industrie [22]. Ces transmissions figurent largement dans beaucoup d'applications: les robots, les appareils de manutention, les systèmes d'alimentation multisources, l'industrie du papier, de textile [23], la traction ferroviaire, et les véhicules hybrides et électriques.

Nous distinguons deux types de couplages : flexible et rigide.

2.5.1 Modélisation du couplage flexible

Le type du couplage dit flexible est le plus couramment utilisé pour relier plusieurs moteurs dans l'industrie [9]. L'interaction des moteurs en raison du couplage flexible, peut être modélisée par le couple d'interaction mutuel [24] :

$$\begin{cases} \text{Tem}_{12} = f(\theta_2 - \theta_1) \\ \text{Tem}_{21} = f(\theta_1 - \theta_2) \end{cases} \quad (2-17)$$

où

θ_1, θ_2 sont les positions des arbres des deux moteurs couplés;

f est la constante de flexibilité de la torsion équivalente et linéaire du ressort.

Les équations dynamiques des deux machines deviennent :

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 = \text{Tem}_1 - f_1 \dot{\theta}_1 + \text{Tem}_{12} - T_{ext1} \\ J_2 \ddot{\theta}_2 = \text{Tem}_2 - f_2 \dot{\theta}_2 + \text{Tem}_{21} - T_{ext2} \end{cases} \quad (2-18)$$

où

J_1, J_2 sont les inerties des deux moteurs;

$\text{Tem}_1, \text{Tem}_2$ sont les couples électromagnétiques des deux moteurs;

$\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2$ sont les vitesses de rotation des arbres des deux moteurs;

$\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2$ sont les accélérations des deux moteurs;

T_{ext1}, T_{ext2} sont les couples externes, incluant les couples de charge.

Si on remplace les couples Tem_{12} et Tem_{21} par leurs expressions on obtient le système d'équations dynamiques des ensembles composant les deux moteurs :

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 = \text{Tem}_1 - f_1 \dot{\theta}_1 + f (\theta_2 - \theta_1) - T_{ext1} \\ J_2 \ddot{\theta}_2 = \text{Tem}_2 - f_2 \dot{\theta}_2 + f (\theta_1 - \theta_2) - T_{ext2} \end{cases} \quad (2-19)$$

Afin d'élaborer un modèle d'état du couplage, les équations dynamiques doivent être écrites en espace de temps puis celui de Laplace, ce qui donne la forme suivante :

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1(t) = \text{Tem}_1(t) - f_1 \dot{\theta}_1(t) + f (\theta_2(t) - \theta_1(t)) - T_{ext1}(t) \\ J_2 \ddot{\theta}_2(t) = \text{Tem}_2(t) - f_2 \dot{\theta}_2(t) + f (\theta_1(t) - \theta_2(t)) - T_{ext2}(t) \end{cases} \quad (2-20)$$

et deviennent dans l'espace de Laplace sous la forme :

$$\begin{cases} (J_1 s^2 + f_1 s + f) \theta_1(s) = \text{Tem}_1(s) + f \theta_2(s) - T_{ext1}(s) \\ (J_2 s^2 + f_2 s + f) \theta_2(s) = \text{Tem}_2(s) + f \theta_1(s) - T_{ext2}(s) \end{cases} \quad (2-21)$$

On pose

$$\begin{cases} \frac{d\theta_1}{dt} = \Omega_1 \\ \frac{d\theta_2}{dt} = \Omega_2 \end{cases} \quad (2-22)$$

Le comportement dynamique du système se résume en la forme suivante

$$\begin{cases} \frac{d\Omega_1}{dt} = \frac{-f_1}{J_1} \Omega_1 - \frac{f}{J_1} \theta_1(t) + \frac{f}{J_1} \theta_2(t) + \frac{1}{J_1} \text{Tem}_1(t) - \frac{1}{J_1} T_{ext1}(t) \\ \frac{d\Omega_2}{dt} = \frac{-f_2}{J_2} \Omega_2 - \frac{f}{J_2} \theta_2(t) + \frac{f}{J_2} \theta_1(t) + \frac{1}{J_2} \text{Tem}_2(t) - \frac{1}{J_2} T_{ext2}(t) \end{cases} \quad (2-23)$$

Le modèle mécanique du système complet peut être présenté par :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = & \begin{bmatrix} \frac{-f_1}{J_1} & 0 & -\frac{f}{J_1} & \frac{f}{J_1} \\ 0 & \frac{-f_2}{J_2} & \frac{f}{J_2} & -\frac{f}{J_2} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Omega_1 \\ \Omega_2 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Tem}_1 \\ \text{Tem}_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{1}{J_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{ext1} \\ T_{ext2} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2-24)$$

2.5.2 Modélisation du couplage rigide

Le couplage rigide est le moins fréquent dans l'industrie [9] (c'est en fait une approximation). Dans ce type de couplage la vitesse et la position des arbres des moteurs sont égales; on a donc :

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta, \Omega_1 = \Omega_2 = \Omega, \dot{\theta}_1 = \dot{\theta}_2 = \dot{\theta}$$

Nous obtenons par conséquent un système décrit par une inertie totale et un frottement visqueux total :

$$J_T = J_1 + J_2 \quad (2-25)$$

$$f_T = f_1 + f_2 \quad (2-26)$$

L'équation dynamique d'un système multimoteur rigidement couplé devient [25] :

$$T_{em1} + T_{em2} - T_{ext} = J_T \frac{d\Omega}{dt} + f_T \Omega \quad (2-27)$$

où

T_{ext} est le couple externe, incluant le couple imposé par la charge ($T_{ext} = T_{ext1} + T_{ext2}$).

2.6 Modélisation de la charge inertielle

2.6.1 Modèle mathématique de la charge inertielle (lien flexible)

Dans le cas où il y a une différence en position entre le moteur d'entraînement et la charge, le ressort engendre une action à cause du lien flexible [24]. Cette action est rétroactive et se traduit par un contre-couple en étant multiplié par la constante de flexibilité. La différence en vitesse quant à elle est multipliée par le coefficient d'amortissement du lien flexible. L'addition des deux grandeurs obtenues donne un couple externe exercé sur la charge par le moteur d'entraînement à cause du couplage flexible, ainsi qu'un couple de charge au moteur (figure 2-6).

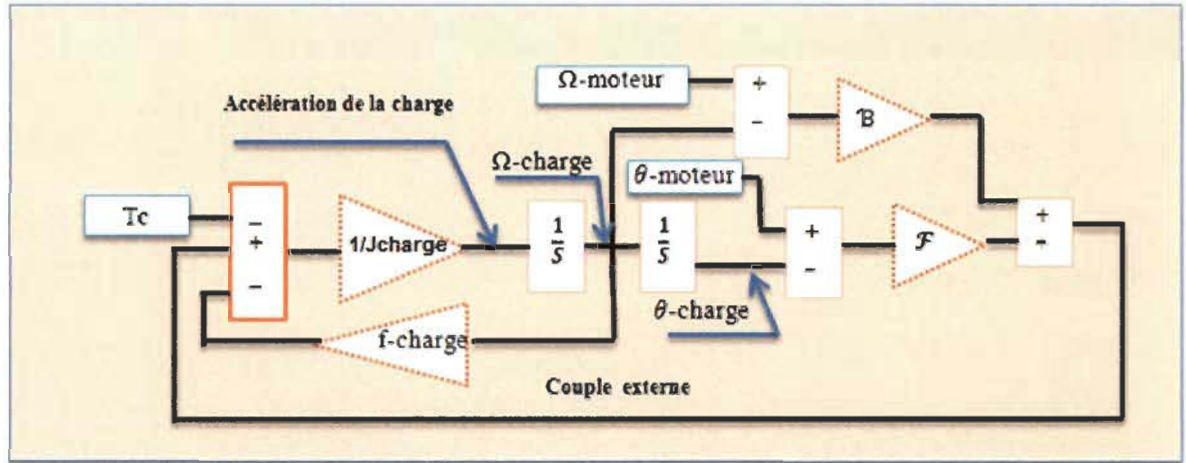


Figure 2-6 Schéma équivalent de la charge inertielle.

Le système mécanique présenté dans la figure peut être exprimé par les équations suivantes :

$$J_{charge} \frac{d\Omega_{charge}}{dt} = T_{coup} - f_{charge} \Omega_{charge} - T_c \quad (2-28)$$

$$T_{coup} = F (\theta_m - \theta_{charge}) + B (\Omega_m - \Omega_{charge}) \quad (2-29)$$

avec

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \Omega_m$$

$$\frac{d\theta_l}{dt} = \Omega_l \quad (2-30)$$

où

J_l ($kg \cdot m^2$) est l'inertie de la charge;

F (Nm/rad) est la constante de flexibilité du lien entre le moteur et la charge;

B ($Nm/(rad/s)$) est le coefficient d'amortissement du lien flexible;

$f_l \left(\frac{Nm}{(rad/s)} \right)$ est le coefficient de frottement visqueux à l'arbre de la charge;

$\Omega_m, \Omega_l \left(\frac{rad}{s} \right)$ sont les vitesses angulaires des arbres du moteur et de la charge;

Tcoup (Nm) est le couple de couplage : couple d'entraînement de la charge correspondant au couple externe du moteur (Text).

2.6.2 Sélection et dimensionnement de la charge

Afin de rendre notre travail plus crédible en l'approchant le plus possible de la réalité, l'utilisation d'un profil de charge dynamique et non linéaire fut indispensable, suivant les grandeurs qui sont : puissance, couple, et vitesse. Nous distinguons quatre types de charges [26]:

- Charge à puissance constante (enrouleuse, compresseur, essoreuse);
- Charge à couple constant (levage, broyeur, pompe...);
- Charge à couple proportionnel à la vitesse (mélangeur);
- Charge à couple proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur, pompe centrifuge).

Dans le cadre de notre travail nous utilisons comme charge une pompe centrifuge, pour la simple raison que c'est le type le plus utilisé dans l'industrie en touchant une large gamme d'applications. L'énergie cinétique fournie par le moteur d'entraînement est transmise au fluide par le biais de la pompe centrifuge. La variation du débit de cette dernière varie proportionnellement avec la variation de la vitesse de l'arbre du moteur. Son couple aussi varie rapidement avec la vitesse, et peut être exprimé par [27] :

$$T_c = k_r \Omega_{charge}^2 \quad (2-31)$$

où

$k_r \left(N \cdot m / (rad/s)^2 \right)$ est le coefficient de proportionnalité.

Le modèle moteur-charge devient

$$J_m \frac{d\Omega_m}{dt} = T_{em} - f_m \Omega_m - T_{coup} \quad (2-32)$$

$$J_{charge} \frac{d\Omega_{charge}}{dt} = T_{coup} - f_{charge} \Omega_{charge} - k_r \Omega_{charge}^2 \quad (2-33)$$

$$T_{coup} = f (\theta_m - \theta_{charge}) + B (\Omega_m - \Omega_{charge}) \quad (2-34)$$

La figure 2-7 présente la courbe caractéristique de la variation du couple imposé par la pompe en fonction de sa vitesse de rotation.

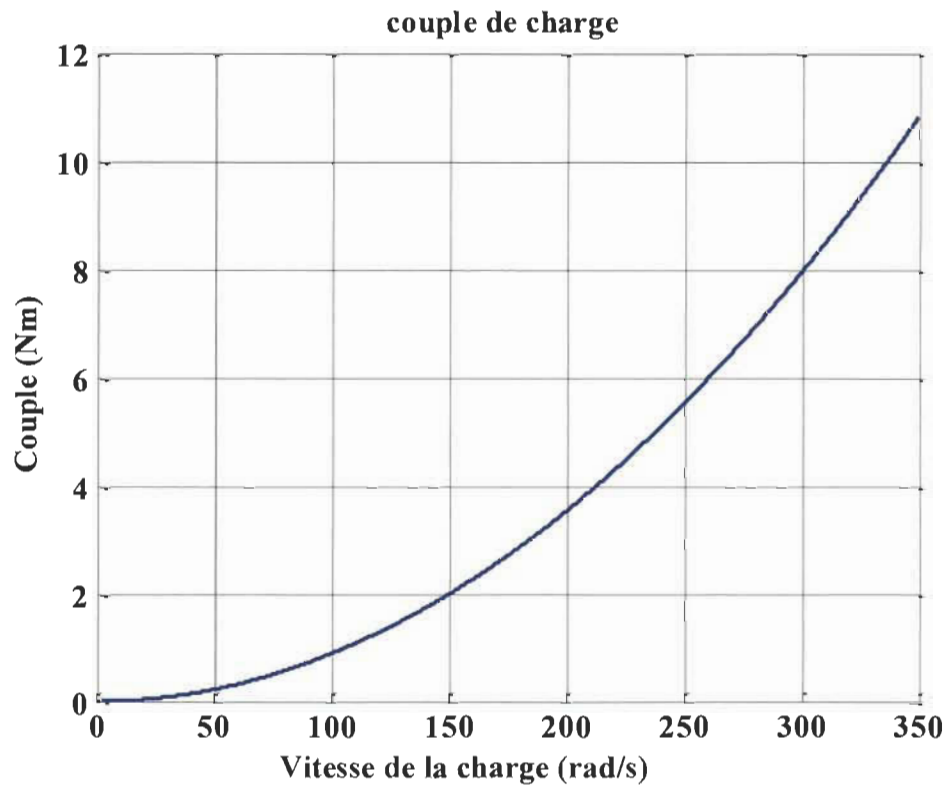


Figure 2-7 Profil de charge imposé par la pompe centrifuge.

2.7 Calcul du bilan énergétique du système d'entraînement multimachine

2.7.1 Calcul du rendement

Le rendement global d'un système d'entraînement multimachine peut être exprimé par la formule suivante :

$$\eta_{tot} = \frac{\eta_1 p_{e1} + \eta_2 p_{e2} + \dots + \eta_n p_{en}}{p_{e1} + p_{e2} + \dots + p_{en}} \quad (2-35)$$

où

η_1, η_2, η_n sont respectivement les rendements des moteurs M_1, M_2, M_n ;

p_{e1}, p_{e2}, p_{en} sont respectivement les puissances électriques des moteurs M_1, M_2, M_n .

On note que la puissance électrique (puissance d'entrée) est définie par:

$$pe = v_d i_d + v_q i_q \quad (2-36)$$

où

v_d, v_q sont respectivement les composantes directe et en quadrature de la tension d'alimentation du moteur;

i_d, i_q sont respectivement les composantes directe et en quadrature du courant d'alimentation du moteur.

La puissance absorbée est définie comme étant la somme de la puissance électrique et le total des pertes dans le système. En effet, alors que les puissances mesurées en pratique puissent être utilisées pour le calcul du rendement, la simulation des systèmes par des modèles non électriques (avec des fonctions de transfert), ne rend pas correctement les

pertes et il faudra employer la puissance absorbée et non la puissance électrique simulée pour le calcul du rendement [28].

Le rendement individuel de chacun des moteurs est donné par l'expression (voir la section 2.7.2):

$$\eta_n = \frac{P_{elm} - (P_{acc} + L_{fri})}{P_{elm} + (\sum L_j + L_{fer} + L_{ond})} \quad (2-37)$$

où

P_{elm}, P_{acc} sont la puissance électromagnétique et celle d'accélération;

L_{fri}, L_j, L_{fer} sont respectivement les pertes de friction, joule, et fer dans le moteur;

L_{ond} sont les pertes dans l'onduleur.

2.7.2 Modélisation des pertes dans le système

La figure 2-8 décrit le flux de l'énergie dans le système, l'indication du point de calcul de l'efficacité et les différents types de pertes prises en considération.

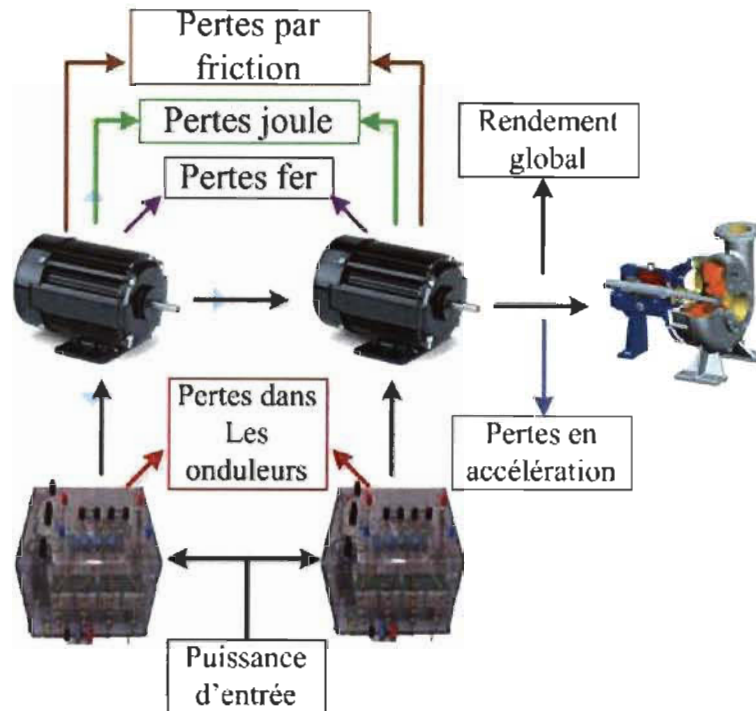


Figure 2-8 Flux d'énergie dans le système.

- Pertes joules :

Dues au passage du courant par les enroulements du stator et peuvent être exprimées par la formule [29]:

$$L_j = R_s I_s^2 = R_s (i_d^2 + i_q^2) \quad (2-38)$$

- Pertes fer

Causées par le phénomène d'hystérésis et les courants de Foucault et données par la formule simplifiée [30]:

$$L_{fer} = c_{fe} \Omega^\gamma (\alpha_d^2 + \alpha_q^2) \quad (2-39)$$

où

$$\gamma = 1.5 \sim 1.6 \text{ et } c_{fe} = 1.5 \sim 1.6$$

$$\alpha_d = L_d \dot{i}_d + \lambda \text{ et } \alpha_q = L_q \dot{i}_q$$

- Pertes par friction

Présentent les pertes mécaniques et deviennent plus importantes à des vitesses élevées. Elles peuvent s'exprimer par l'expression :

$$L_{fri} = f \Omega^2 \quad (2-40)$$

- Pertes dans les onduleurs

Ce type de pertes peut être classé en deux catégories [31]:

- ✓ Les pertes par conduction;
- ✓ Les pertes par commutation.

2.8 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la modélisation générale du système multimoteur multiconvertisseur; la description mathématique détaillée du couplage flexible ainsi qu'un aperçu des pertes prises en compte dans les bilans calculés dans les prochains chapitres. Les stratégies proposées dans ce travail seront testées sur le système décrit dans cette partie.

Chapitre 3 - Répartition des charges à base des techniques de l'allocation dynamique du contrôle

L'aspect répartition des charges est introduit pour décrire un système ou un certain nombre de moteurs couplés mécaniquement entraînant une charge commune. Le couple électromagnétique requis provient de l'ensemble des actionneurs qui exerce son action d'une façon coopérative. La première étape pour adresser le besoin d'un banc multimachine est de déterminer la nécessité d'introduire des moteurs en action selon le besoin en puissance requise; la répartition des forces implique plusieurs moteurs et variateurs pour entraîner la même charge. Chaque unité doit apporter sa contribution proportionnelle à la puissance imposée par la charge entraînée, selon un coefficient de répartition.

Assurer une stratégie optimale de répartition des charges passe forcément par la gestion des consignes, autrement dit les signaux de commande. Pour ce fait, on conçoit un algorithme d'allocation de commande selon certaines contraintes et positionné entre le bloc de régulation de l'entrée de réglage et le système (les actionneurs).

L'allocation de la commande est la tâche qui consiste à faire la répartition d'une entrée de commande principale entre un certain nombre d'actionneurs qui composent le système en générant les entrées de réglage désirées pour chacun (figure 3-1). La majorité des techniques d'allocation du contrôle sont statiques [32].

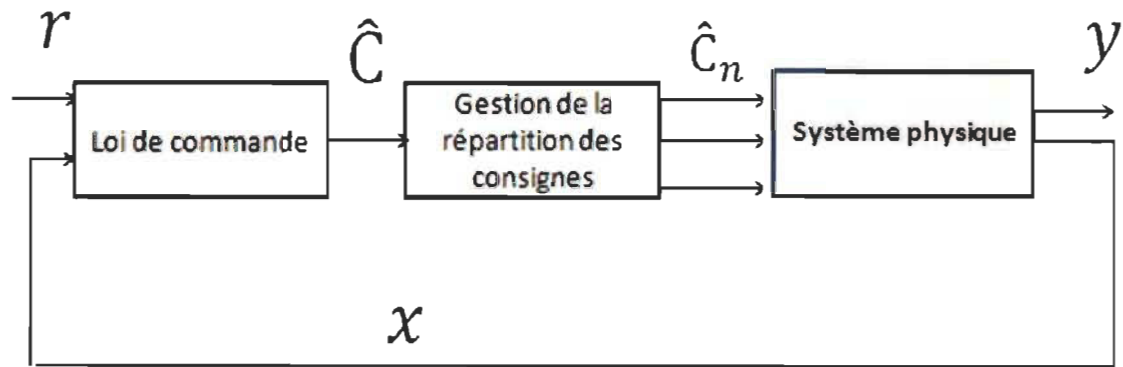


Figure 3-1 Principe de l'allocation du contrôle.

Pour cerner le problème de la répartition des consignes, on considère le système dynamique et linéaire suivant [33]

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3-1)$$

Où

$A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Matrice d'état

$B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ Matrice d'entrée de commande

$x(t) \in \mathbb{R}^n$ Vecteur d'état

$u(t) \in \mathbb{R}^m$ Entrée de commande

La répartition de la commande consiste à générer les entrées de commande désirées pour les divers actionneurs à partir de l'entrée de commande principale. Supposons une entrée de commande virtuelle $v \in \mathbb{R}^n$, le problème de la répartition peut être résolu par l'équation

$$v = Bu \quad (3-2)$$

avec la contrainte

$$u_{min} < u < u_{max}$$

où

u_{\min} et u_{\max} sont les limites minimales et maximales des entrées de commande des actionneurs.

La tâche qui porte sur la gestion des consignes est dédiée à un bloc positionné habituellement entre le système et le bloc de régulation, ce bloc comprend un algorithme pour assurer l'allocation du contrôle (pseudo inverse) ou (Daisy Chain) conçu dans le but de trouver la combinaison la plus optimale des signaux de commande à appliquer aux divers actionneurs selon le critère choisi.

La procédure permettant de générer des consignes réelles à partir d'une consigne généralisée ou virtuelle, dans notre cas (le couple électromagnétique requis) à l'aide de la technique pseudo inverse et Daisy Chain fait l'objet d'une évaluation des performances des deux méthodes.

3.1 Répartition des charges à base de la technique pseudo inverse

La technique pseudo inverse s'identifie comme étant une méthode d'optimisation sous contraintes. Elle est basée sur le calcul de la matrice pseudo inverse de la matrice de commande B généralement non carrée. Le problème de répartition des forces peut être identifié comme un problème d'optimisation avec contraintes et formulé comme suit [34]:

$$\min_{\delta} J = \min_{\delta} \frac{1}{2} (\delta + c)^T W (\delta + c) \quad (3-3)$$

avec,

$$B\delta = d_{\text{des}} \quad (3-4)$$

où

$\delta \in \mathbb{R}^n$, vecteur de commande

$W \in \mathbb{R}^{n \times n}$ Matrice de pondération

$c \in \mathbb{R}^n$ Vecteur de décalage par rapport aux conditions nominales des actionneurs

$B \in \mathbb{R}^{m \times n}$ la matrice de l'efficacité du contrôle

d_{des} les moments désirés

La résolution du problème d'optimisation passe en premier lieu par le calcul de l'Hamiltonien (H), tels que :

$$H = \frac{1}{2}(\delta^T W \delta + c^T W \delta + \delta^T W c + c^T W c) + \xi(B\delta - d_{des}) \quad (3-5)$$

où $\xi \in \mathbb{R}$ est le multiplicateur de Lagrange.

En calculant la dérivée partielle de H par rapport à δ et ξ respectivement, et en mettant l'équation égale à 0 on obtient :

$$\frac{\partial H}{\partial \delta} = W\delta + \frac{1}{2}(c^T W)^T + \frac{1}{2}Wc + (\xi B)^T = 0 \quad (3-6)$$

$$\Rightarrow W\delta = -Wc - B^T \xi^T$$

$$\text{et} \quad \frac{\partial H}{\partial \xi} = B\delta - d_{des} = 0 \quad (3-7)$$

$$\Rightarrow B\delta = d_{des}$$

$$BW^{-1}W\delta = d_{des}$$

En remplaçant l'équation (3-6) dans l'équation (3-7) on obtient :

$$BW^{-1}(-Wc - B^T \xi^T) = d_{des} \quad (3-8)$$

On cherche l'expression de ξ^T dans l'équation (3-8) on obtient :

$$\xi^T = -(BW^{-1}B^T)^{-1}[d_{des} + Bc] \quad (3-9)$$

Par le remplacement de l'équation (3-9) dans l'équation (3-6) on obtient :

$$W\delta = -Wc + B^T(BW^{-1}B^T)^{-1}[d_{des} + Bc] \quad (3-10)$$

La simplification de l'équation (3-10), donne :

$$\delta = -c + W^{-1}B^T(BW^{-1}B^T)^{-1}[d_{des} + Bc]$$

$$\delta = -c + B^\# [d_{des} + Bc]$$

où

$B^\#$ Le pseudo inverse de la matrice B

$(.)^\#$ L'opérateur pseudo inverse.

On note que les moteurs dans le système d'entraînement proposé sont couplés sur le même arbre, par des transmissions flexibles ayant les mêmes caractéristiques, alors la répartition des couples par cette méthode correspond à une répartition égale entre les moteurs.

3.1.1 Tests et simulations

Afin d'étudier le comportement du système d'entraînement avec l'algorithme pseudo inverse comme stratégie de répartition des charges, une série de simulations a été réalisée dans l'environnement MATLAB-Simulink d'une durée de $t = 10s$, ayant comme méthode de calcul l'algorithme d'intégration 'ode4 (Runge-Kutta)' avec un pas de simulation fixe égal à $1e^{-5}s$. Le système d'entraînement est composé essentiellement de trois moteurs

synchrones à aimants permanents dont les paramètres sont donnés dans le tableau 3-1. Un profil de charge dynamique et non linéaire imposé par une pompe centrifuge a été appliqué dans le but de tester les performances du système dans des conditions proches de la pratique. Le profil de la vitesse est choisi variable dans le temps afin de pouvoir distinguer clairement les différentes plages de fonctionnement de la charge ainsi que les performances du système avec chacune des stratégies de répartition, la commande vectorielle est utilisée pour assurer la régulation du système.

Tableau 3-1 Paramètres des moteurs

Paramètres	M1	M2	M3
Puissance nominale (kW)	1.5	1.1	1.1
Couple nominal (N·m)	5	4.1	3
Inductance directe (H)	5.974e-3	25.02e-3	4e-3
Inductance en quadrature (H)	5.974e-3	40.17e-3	4.5e-3
Résistance statorique (Ω)	0.78	6.2	0.57
Flux de l'aimant permanent (Wb)	0.148	0.305	0.064
Coefficient de friction (N·m·s)	5e-5	0.0011	0.0039
Inertie (kg·m ²)	4.89e-4	0.0036	0.00208
Nombre de paires de pôles	3	3	2

3.1.2 Résultats des simulations

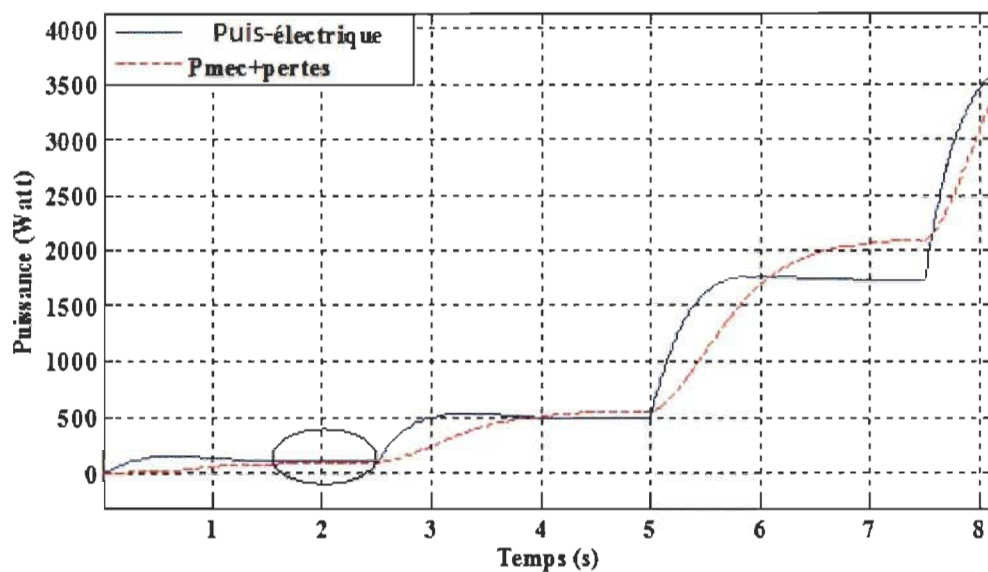


Figure 3-2 Puissances

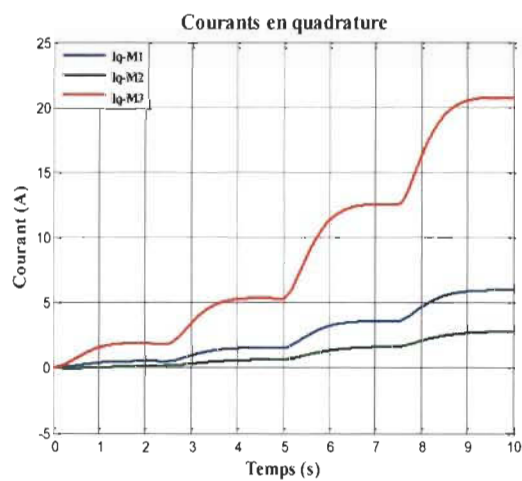


Figure 3-3 Courants i_q

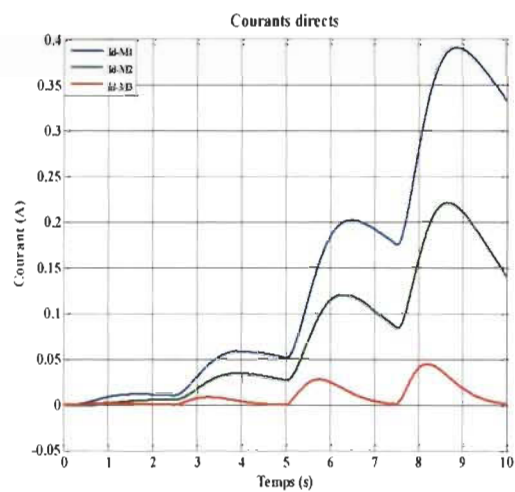
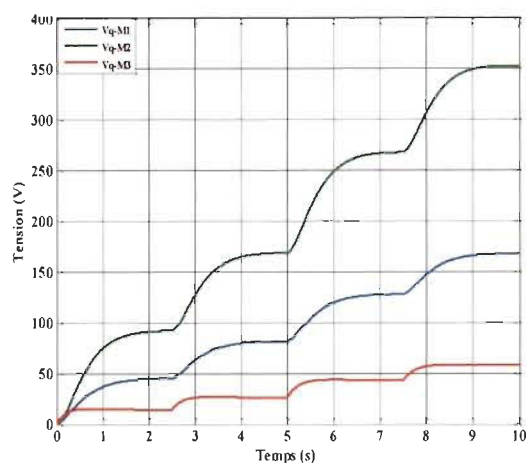
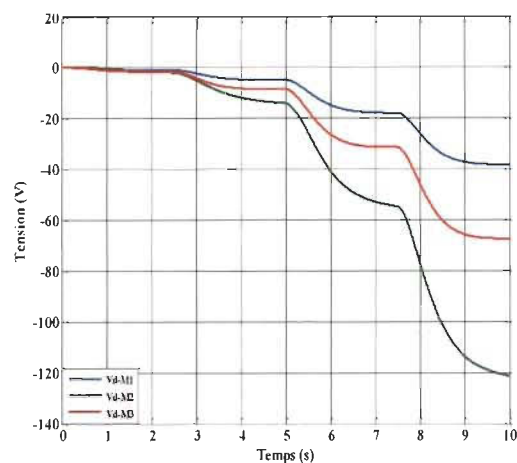


Figure 3-4 Courants i_d

Tensions en quadrature

Figure 3-5 Tensions v_q

Tensions directes

Figure 3-6 Tensions v_d

Couples

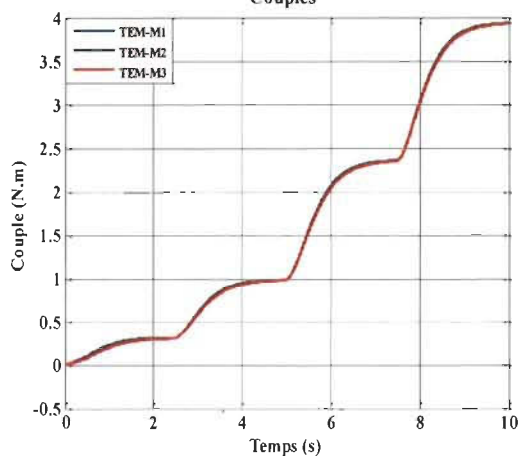


Figure 3-7 Caractéristiques des couples

Couples de références

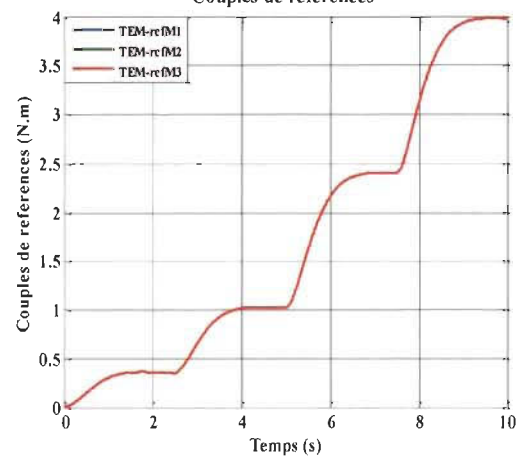


Figure 3-8 Couples de référence

Vitesses

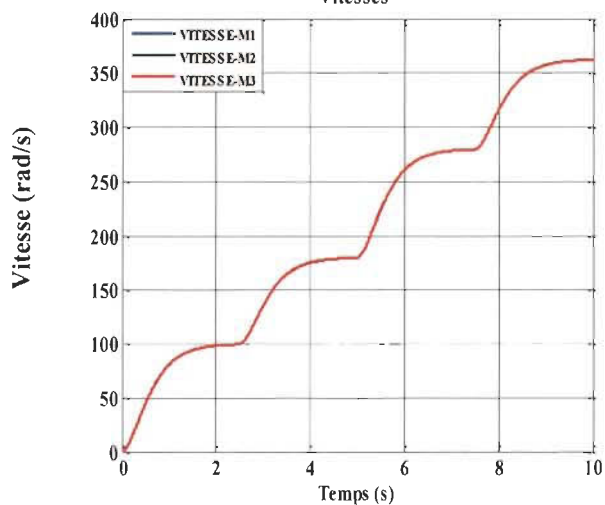


Figure 3-9 Vitesses de rotation des moteurs

Vitesses

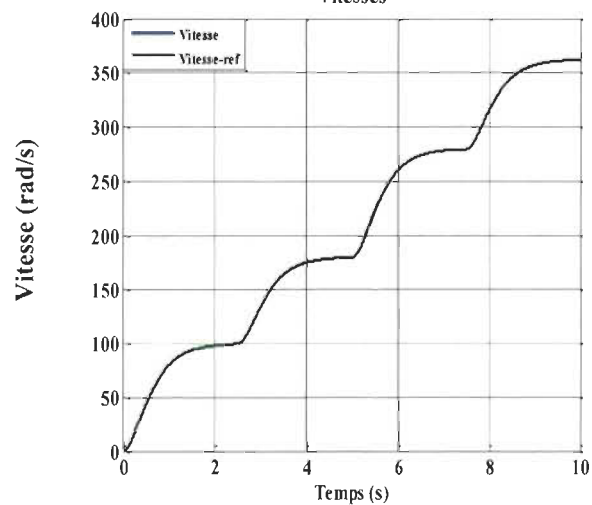


Figure 3-10 Vitesse de rotation de la charge

3.2 Répartition des charges à base de la technique *Daisy Chain*

La technique *Daisy Chain* assure une répartition hiérarchique de la consigne globale. La puissance requise pour l'entraînement de la charge est répartie sur les actionneurs (les trois moteurs dans notre cas) en cascade, c'est-à-dire que le deuxième actionneur ne sera pas activé avant que le premier ne soit saturé (atteint son couple maximal); les limites de saturation sont choisies selon les valeurs des couples maximaux de chaque machine. Si la consigne globale est supérieure à la limite de saturation du premier actionneur, le deuxième actionneur rentre en fonction et prend comme consigne la différence entre la consigne globale, et celle produite par le premier actionneur, autrement dit l'erreur entre la consigne globale et la consigne produite par le premier actionneur, alors que le second groupe génère les forces résiduelles. Donc l'idée est de prioriser un certain groupe d'actionneurs, d'où le placement préférable des actionneurs ayant les fautes les moins significatives les premiers, en haut de la chaîne. La figure 3-11 explicite le principe de cette technique.

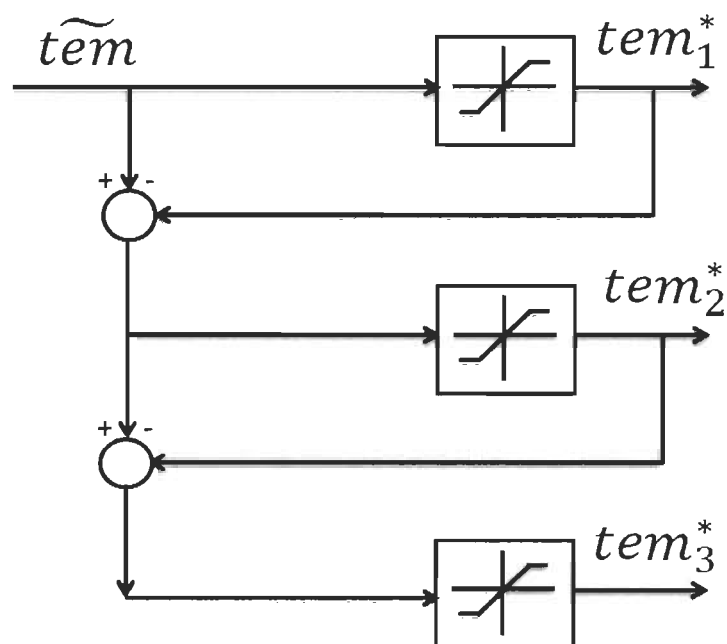


Figure 3-11 Schéma de principe de la technique Daisy Chain.

3.2.1 Principe de la technique Daisy Chain

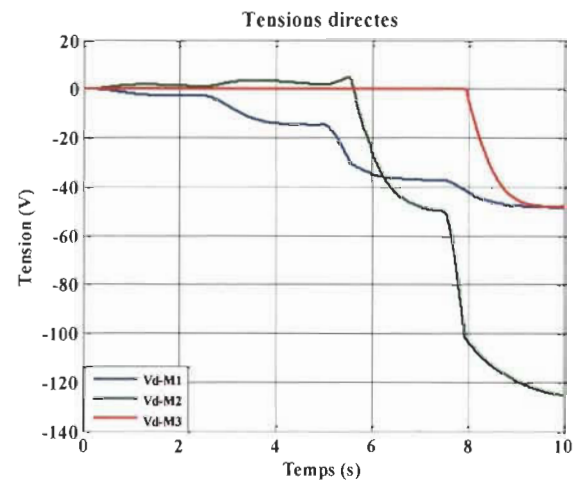
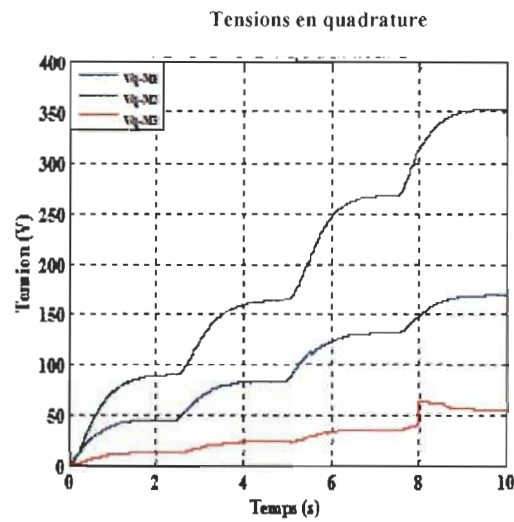
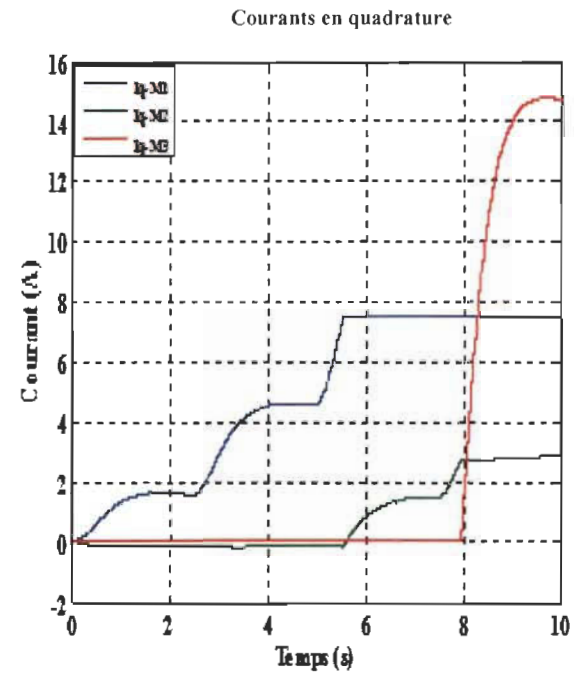
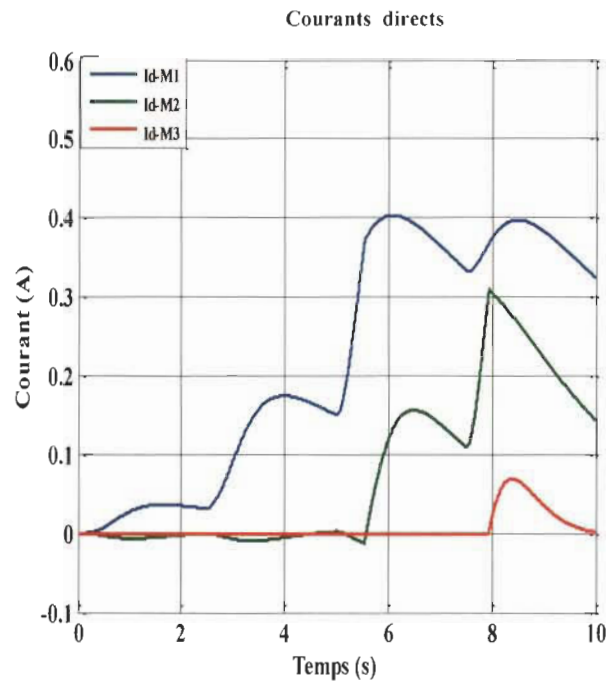
On a utilisé la technique *Daisy Chain* pour assurer la répartition des forces dans notre système composé de trois moteurs et l'objectif est de produire un couple électromagnétique désiré symbolisé par $\widetilde{t_{em}}$, la tâche est assurée par les trois actionneurs selon le principe expliqué, et le but est de satisfaire l'équation

$$\widetilde{t_{em}} = B t_{em}^* \quad (3-11)$$

3.2.2 Tests et simulations

Dans l'environnement MATLAB®-Simulink™; le même système d'entraînement décrit dans la section 3.1 avec la technique *Daisy Chain* comme stratégie de répartition de la charge a subi une série de simulations. Le même profil de charge et de vitesse de référence a été imposé, ce qui permet de réaliser une évaluation du comportement du système d'entraînement dans les deux cas, et d'établir une étude comparative en testant les performances de chacune des deux méthodes dans exactement les mêmes conditions.

3.2.3 Résultats des simulations



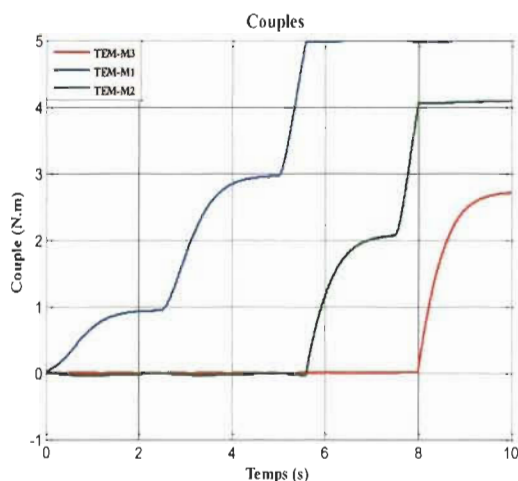


Figure 3-16 Caractéristiques des couples

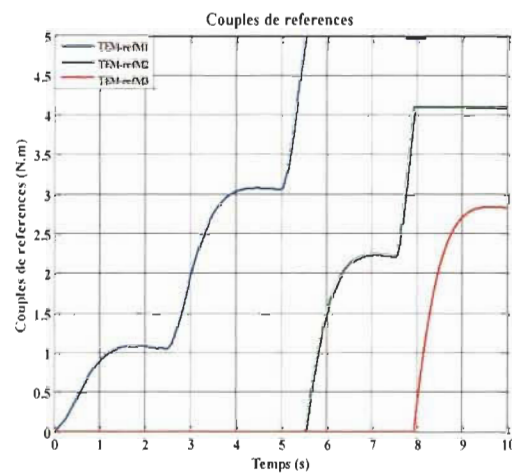


Figure 3-17 Couples de référence

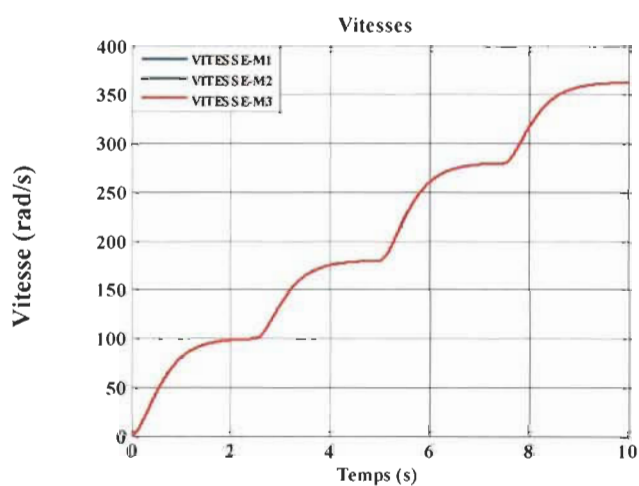


Figure 3-18 Vitesses de rotation des moteurs

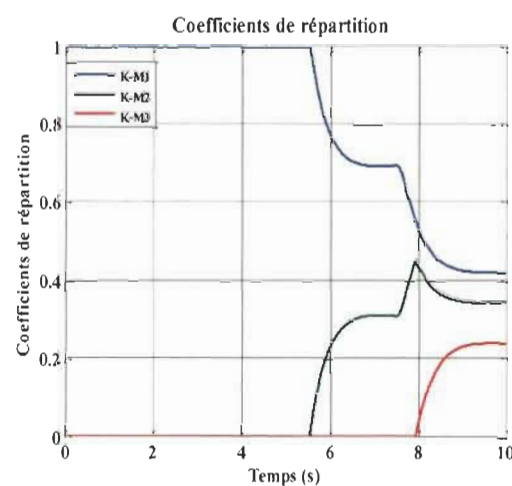


Figure 3-19 Coefficients de répartition

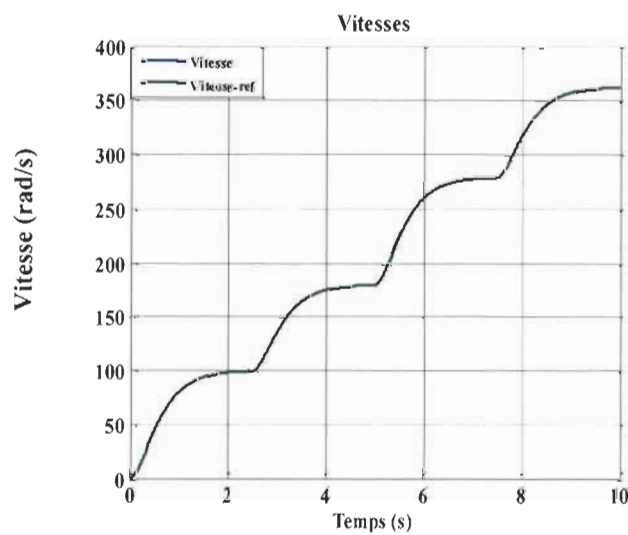


Figure 3-20 Vitesse de rotation de la charge

3.3 Discussion des résultats des simulations

Les résultats de simulation mettent en évidence la différence dans le comportement du système dans les deux méthodes. Les figures 3-10 et 3-20 montrent que les vitesses de la charge sont très similaires pour les deux stratégies. Les figures 3-7 et 3-16 montrent la différence entre les caractéristiques des couples électromagnétiques des moteurs dans les deux cas. Les trois couples de référence des moteurs dans la méthode pseudo inverse sont identiques (répartition égale) (figure 3-8). Les moteurs partagent la charge de façon équitable dans la technique pseudo inverse, tandis que dans la technique *Daisy Chain*, seulement le premier moteur est utilisé pour le démarrage; les moteurs sont par la suite activés selon le principe de la technique et les coefficients de partage attribués à chacun (figure 3-19). Les couples électromagnétiques fournis par les moteurs respectent les plages de fonctionnement imposées par leurs références dans les deux stratégies (figures 3-7, 3-8, 3-16 et 3-17).

Les courants et les tensions des trois machines dans les deux méthodes diffèrent en amplitude et en phase et cela est dû au fait qu'ils ne soient pas identiques, et en faisant la comparaison des paramètres cités entre chacune des machines dans les deux cas, on constate clairement les différences et cela est dû aux coefficients de répartition qui sont égaux et constants pour la technique pseudo inverse, et dynamiques et variables pour la technique *Daisy Chain*.

La puissance électrique doit être en pratique supérieure à la puissance électromagnétique et aussi à la puissance mécanique additionnée à toutes les pertes dans le système puisque c'est la puissance d'entrée. La figure 3-2 nous montre que cette théorie n'est pas vérifiée dans les simulations effectuées dans ce travail, ni dans les simulations

d'autres publications. Cela est dû au fait que le modèle mathématique ne prend pas en considération la totalité des pertes. On voit bien que les deux grandeurs présentées dans cette figure sont égales en régime permanent (1.5s à 2.5s), et différentes en accélération. La puissance absorbée telle que définie à la section 2.7.1 est une meilleure approximation de la puissance à l'entrée du système.

3.4 Évaluation des performances des deux techniques de répartition

Le critère d'évaluation adopté lors de cette étude est d'un aspect purement énergétique. Pour ce faire, l'étude est basée sur la comparaison des taux de consommation, absorption, et dissipation en puissances pour le système d'entraînement pour les deux techniques de répartition.

La technique *Daisy Chain* fournit un rendement global du système qui est meilleur que celui obtenu par la technique pseudo inverse (Figure 3-24), et permet une diminution considérable de la puissance dissipée en pertes (Figures 3-21, 3-22 et 3-23), de la consommation en puissance électrique (Figure 3-25) et par conséquent une optimisation de la puissance absorbée (Figure 3-26) qui est la somme de la puissance électrique et les pertes. On note que la différence la plus importante au niveau des pertes entre les deux approches est au niveau des pertes Joule ce qui rend plus élevé le rendement du system avec la technique *Daisy Chain*.

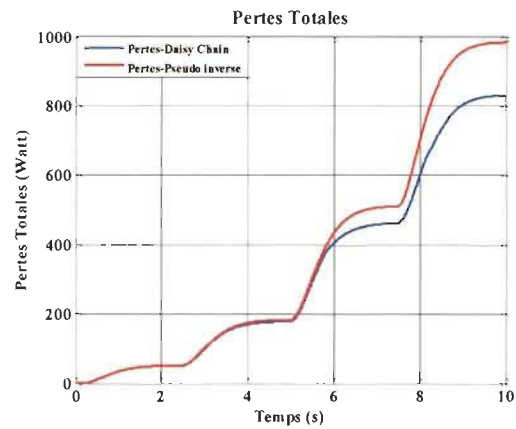


Figure 3-21 Pertes totales

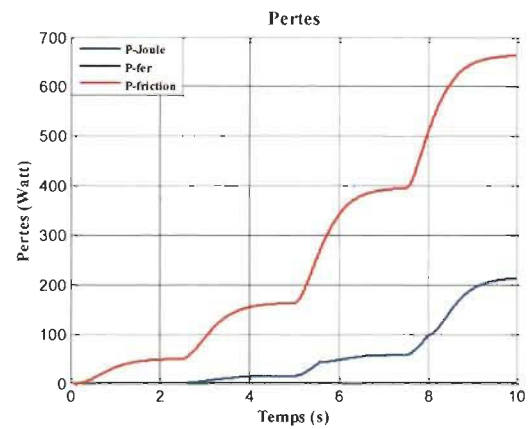


Figure 3-22 Pertes (Daisy Chain)

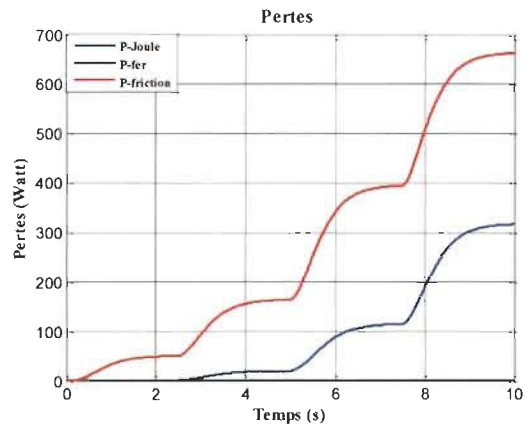


Figure 3-23 Pertes (Pseudo inverse)

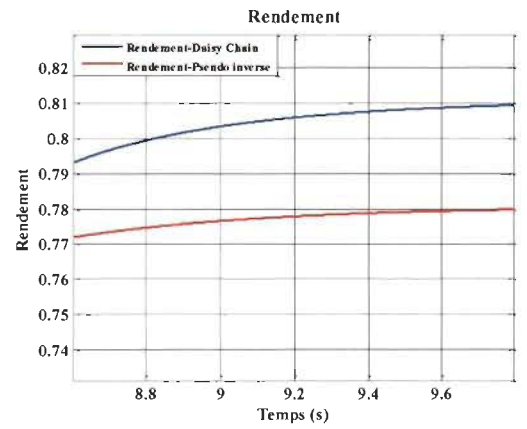


Figure 3-24 Rendement global

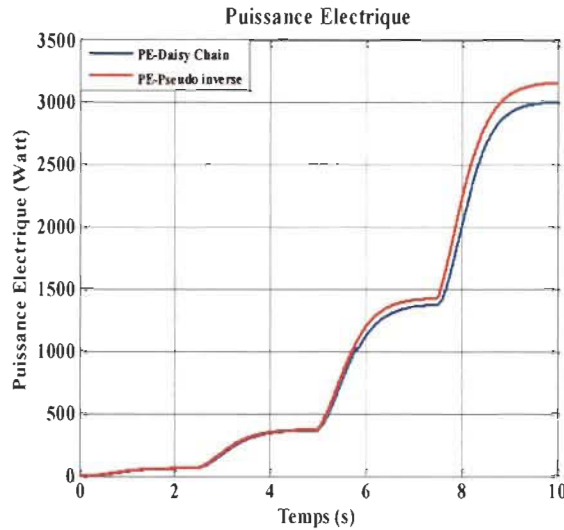


Figure 3-25 Puissance électrique

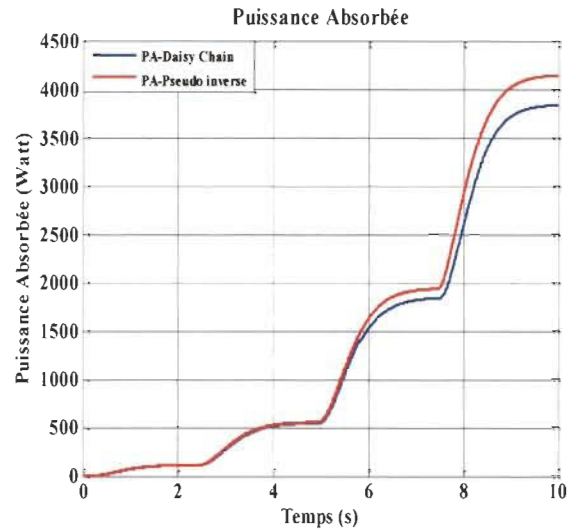


Figure 3-26 Puissance absorbée

3.5 Conclusion

Deux stratégies inspirées des techniques de l'allocation de contrôle ont été utilisées pour assurer la répartition de la charge dans un système d'entraînement multimachine; les deux méthodes furent implémentées avec succès selon le principe de chacune.

La technique *Daisy Chain* démontre une supériorité par comparée à la technique pseudo inverse en matière de diminution des pertes dans le système d'entraînement, de sa puissance électrique, et absorbée. De plus; elle révèle une facilité et simplicité d'implémentation et permet de limiter la sollicitation d'un ou plusieurs actionneurs ainsi que la favorisation de certains actionneurs par rapport aux autres en les plaçant en haut de la chaîne, et donne également plus de précision puisque les grandeurs ne peuvent pas dépasser leurs limites. Cependant elle reste limitée lorsqu'il s'agit de générer des signaux de référence qui soient optimaux pour toutes les plages de fonctionnement, un problème dont les solutions vont être suggérées dans le prochain chapitre en proposant une stratégie plus efficiente basée sur la logique floue.

Chapitre 4 - Stratégies de la répartition des charges

La question prioritaire à poser avant de songer à basculer vers un système multimoteur pour l'entraînement d'une charge dynamique est d'inspecter l'utilité du changement. Pour ce fait, deux systèmes d'entraînement d'une pompe centrifuge sont présentés afin d'élaborer une étude comparative et de rechercher les moyens les plus efficaces pour le fonctionnement de notre charge dans différentes gammes. La pompe impose un profil de charge pour le premier système, qui est un moteur dont la puissance nominale répond à la charge. Le même profil est imposé à un système composé de deux moteurs flexiblement couplés dont la somme des puissances est équivalente à celle du premier système. Les deux moteurs procèdent à entraîner la pompe de manière coopérative et non égale, et la répartition de la charge est assurée par un algorithme flou. L'activation des moteurs est indiquée par le point de fonctionnement de la pompe.

4.1 Répartition des charges à base de la logique floue

La recherche de la stratégie la plus optimale de la gestion de la répartition de la charge, autrement dit l'ensemble des coefficients de répartition la plus optimale nous a mené droit vers la logique floue, afin de tirer les avantages offerts par cette technique en matière de la traduction de l'expertise et du raisonnement humain pour établir une stratégie efficace qui régit le fonctionnement du système étudié et permet d'atteindre un rendement maximal des

deux moteurs et du système global. Nous visons de plus à maximiser la durée de vie des moteurs en les faisant fonctionner dans leurs régimes nominaux.

4.1.1 Principe de la logique floue [35]

La logique floue est une extension de la logique booléenne, et elle est caractérisée par son raisonnement approximatif. Elle se base sur des règles floues qui reflètent un langage humain, sous la forme de variables linguistiques. Notre système décisionnel à base floue se caractérise par quatre blocs constitutifs :

- ✓ La fuzzification
- ✓ Le moteur d'inférence
- ✓ La base des connaissances
- ✓ La déffuzification
- **Fuzzification :**

Un ensemble flou enveloppe plusieurs valeurs logiques allant de 0 jusqu'à 1; une fonction d'appartenance est utilisée pour associer une entrée dans le domaine des nombres réels dans l'intervalle [33]. On peut définir un ensemble flou comme suit.

Soit S un ensemble flou et X un élément de cet ensemble, F un sous-ensemble flou de S est défini par une fonction d'appartenance $\mu_f(x)$, qui mesure le degré auquel X appartient à F.

Dans la théorie des ensembles flous, l'ensemble flou S est définit comme une fonction :

$$\mu_A(x) : X \rightarrow 0,1$$

où $\mu_A(x) = 1$ si x est totalement dans A , $\mu_A(x) = 0$, si x n'est pas dans A et $0 < \mu_A(x) < 1$ si x est partiellement dans A .

- **Règles floues**

Le raisonnement de la logique floue se base sur les règles floues qui à leur tour s'expriment en langage humain en utilisant les variables linguistiques. Une règle floue a la forme suivante :

Si $x \in A$ et $y \in B$ alors $k_1 \in C$, et $k_2 \in C$ avec A , B et C des ensembles flous, x et y sont les entrées de notre système flou, k_1 et k_2 sont les sorties de notre système (figure 4-1).

- **Moteur d'inférence**

Il décrit la manière par laquelle les ensembles flous interagissent ensemble et sa tâche consiste à trouver la fonction d'appartenance résultante globale. La conclusion finale d'un système d'inférence est le résultat de la combinaison des résultats de différentes règles activées en utilisant les normes (T-norme) ou T-conorme [36] :

1. Par T-norme : la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou Y' , qui est le résultat de l'agrégation, est définie de la manière suivante :

$$\forall y, \mu_{Y'}(y) = T(\mu_{A^1}(y) \dots \mu_{A^N}(y)) \quad (4-1)$$

avec T la T-norme Min et N est le nombre de règles activées.

2. Par T-conorme : la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou Y' , qui est le résultat de l'agrégation, est définie de la manière suivante :

$$\forall y, \mu_{Y'}(y) = \perp (\mu_{A^1}(y) \dots \mu_{A^N}(y)) \quad (4-2)$$

avec \perp la T-conorme Max et N est le nombre de règles activées.

- *Défuzzification :*

C'est l'opération qui inversement à la fuzzification, consiste à transformer un nombre flou en une grandeur numérique qui est la sortie de notre système flou et dans le cas de notre application, elle représente les coefficients de répartition.

Parmi les méthodes de défuzzification les plus répandues, on trouve celle du Centre de gravité définie par la formule

$$y_j(k) = \frac{\sum_{l=1}^r y_l \mu_{B'}(y)}{\sum_{l=1}^r \mu_{B'}(y)} \quad (4-3)$$

avec $l = 1, \dots, r$ et r est le nombre de règles.

4.1.2 Stratégie floue de la répartition des forces

L'objectif principal de l'approche de gestion de la répartition des charges proposée est l'utilisation efficace de l'énergie. La contribution non nécessaire de l'une des unités du banc multimoteur dans l'entraînement de la charge cause des pertes d'énergie qu'on peut éliminer en concevant une stratégie de gestion optimale. Les moteurs constituant notre système ne doivent pas partager la charge également sauf dans un cas bien déterminé. Par conséquent chacun des moteurs doit contribuer selon le coefficient que l'on a attribué, selon l'équation :

$$tem_i^* = k_i T_{tot} \quad (4-4)$$

où $k_i \geq 0$ est le coefficient de répartition attribué au i^{eme} moteur en tenant compte de la contrainte $\sum_{i=1}^n k_i = 1$ et qui est aussi la sortie de notre système flou, figure (4-1).

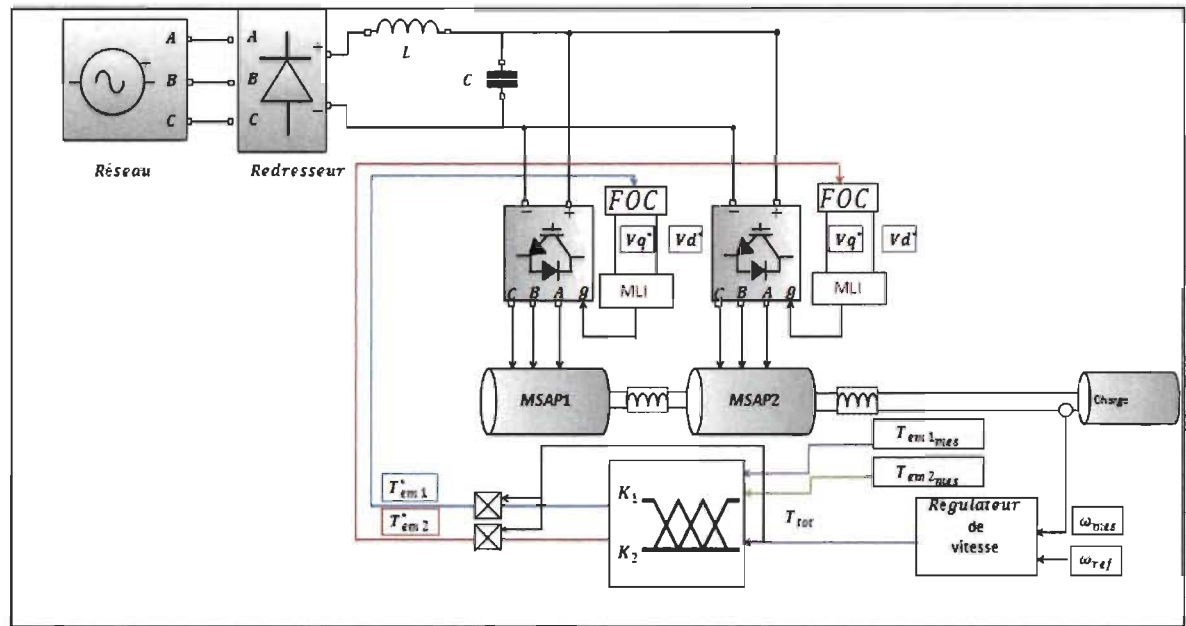


Figure 4-1 Schéma bloc du système d'entraînement avec la technique proposée

La stratégie de répartition floue est basée sur une expertise humaine, et s'articule principalement sur l'expérience, pour décrire une situation et en déduire la décision convenable. Les termes linguistiques utilisés pour les fonctions d'appartenance d'entrée sont symbolisés par "S (Small)", "M (Medium)", "L (Large)", figure 4-2.

Pour montrer la logique du bloc de répartition, on prend un système composé de deux moteurs synchrones à aimants permanents ($n=2$), et donc notre bloc flou prend trois entrées: le couple total requis ($\widetilde{t_{em}}$) pour l'entraînement de la charge ainsi que les couples fournis par les deux moteurs composant notre système. Le bloc flou génère les coefficients de répartition k_1, k_2 , selon les règles floues représentées dans les tableaux 4-1, 4-2 et 4-3.

Les fonctions d'appartenance de la sortie sont choisies de manière à satisfaire la condition $\sum_{i=1}^n k_i = 1$. L'idée de l'algorithme est basée sur la connaissance du couple total requis pour l'entraînement de la charge, ainsi que les plages dans lesquelles les couples électromagnétiques des moteurs varient. Du coup, si le couple total requis peut être garanti

par la première machine, on met donc à l'arrêt la deuxième; l'algorithme flou est fondé sur une logique qui permet à chaque moteur de fonctionner dans sa plage optimale, les fonctions d'appartenance de sortie permettent de générer les coefficients de répartition adéquats et sont symbolisés par "Z (Zero)", "VS (Very Small)", "MS (Medium Small)", "S (Small)", "LS (Large Small)", "M (Medium)", "L (Large)", "VL (Very Large)" et qui correspondent à des valeurs numériques présentant les coefficients de répartition. À l'aide des fonctions d'appartenance d'entrée du bloc flou, on peut distinguer les plages dans lesquelles peut varier le couple total requis ainsi que celui des moteurs, et à base des règles floues, on contrôle le pourcentage attribué à chacune des machines selon le besoin (la plage dans laquelle se situe le couple requis) et les performances de chacun des moteurs.

Tableau 4-1 Règles floues pour T_{tot} est S

Tem_1	Tem_2		
	S	M	L
S	0.67/0.33	0.75/0.25	0.75/0.25
M	0.75/0.25	0.75/0.25	0.67/0.33
L	1/0	1/0	1/0

Tableau 4-2 Règles floues pour T_{tot} est M

Tem_1	Tem_2		
	S	M	L
S	0.75/0.25	0.67/0.33	0.75/0.25
M	0.67/0.33	0.67/0.33	0.75/0.25
L	0.75/0.25	0.75/0.25	0.75/0.25

Tableau 4-3 Règles floues pour T_{tot} est L

Tem_1	Tem_2		
	S	M	L
S	0.75/0.25	0.75/0.25	0.75/0.25
M	0.67/0.33	0.67/0.33	0.67/0.33
L	0.67/0.33	0.67/0.33	0.67/0.33

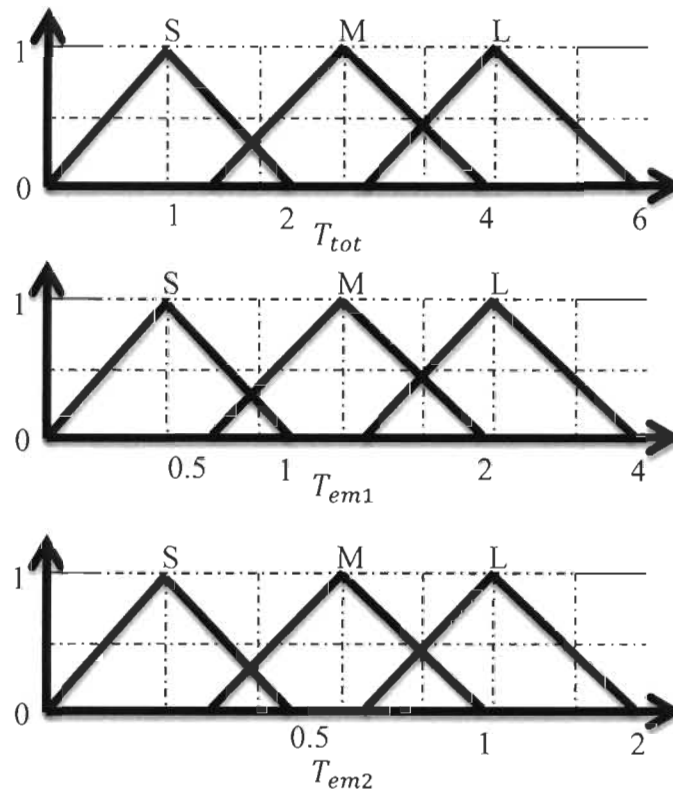


Figure 4-2 Fonctions d'appartenance

4.1.3 Tests et simulations

Dans le but d'évaluer les performances des deux systèmes d'entraînement proposés, une série de simulations a été réalisée dans l'environnement MATLAB®-Simulink™.

Le système1 est un moteur synchrone à aimant permanent d'une puissance nominale égale à 2,5 kW, le système2 est composé de deux moteurs synchrones à aimants permanents flexiblement couplés; l'un est d'une puissance nominale égale à 1,5 kW, alors que celle de l'autre est égale à 1kW. Les paramètres des moteurs utilisés dans cette étude sont donnés dans le tableau 4-4. Le même profil de charge a été appliqué pour les deux systèmes afin d'évaluer leur comportement dans les différentes plages de fonctionnement sous les mêmes conditions. Un profil de vitesse variable dans le temps a été imposé afin de distinguer clairement les différentes plages de fonctionnement.

Afin de rendre dominante l'inertie de la charge, et tenir compte des inerties des arbres additionnels requis par le système bimachine; la valeur de l'inertie de la charge est supposée dix fois l'inertie du moteur directement lié avec cette dernière.

Tableau 4-4 Paramètres des moteurs

Paramètres	S1	M1	M2
Puissance nominale (kW)	2.5	1.5	1
Couple nominal (N·m)	6	4	2
Inductance directe (H)	8.5e-3	6.6e-3	102.7e-3
Inductance en quadrature (H)	10e-3	5.8e-3	44.8e-3
Résistance statorique (Ω)	0.2	1.4	5.8
Flux de l'aimant permanent (Wb)	0.175	0.15	0.533
Coefficient de friction (N·m·s)	0.005	0.00038	0.0006
Inertie (kg·m ²)	0.089	0.00176	0.00529
Nombre de paires de pôles	4	3	2

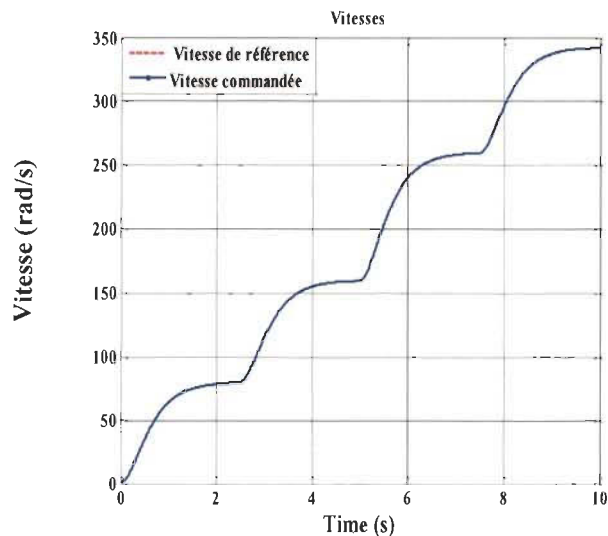


Figure 4-3 Caractéristique de la vitesse (S1)

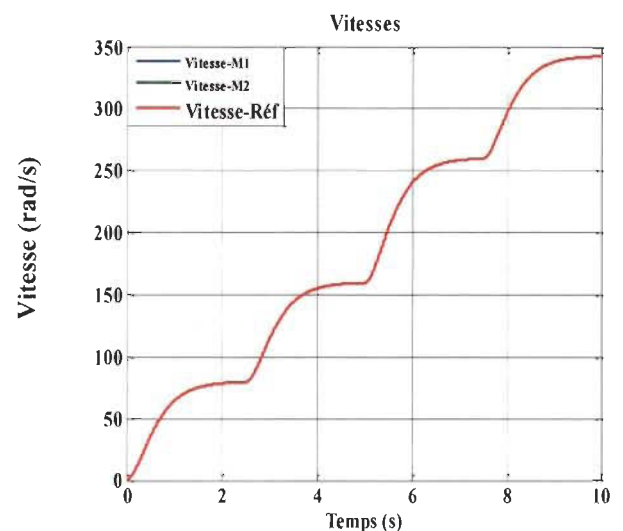


Figure 4-4 Caractéristique des vitesses (S2)

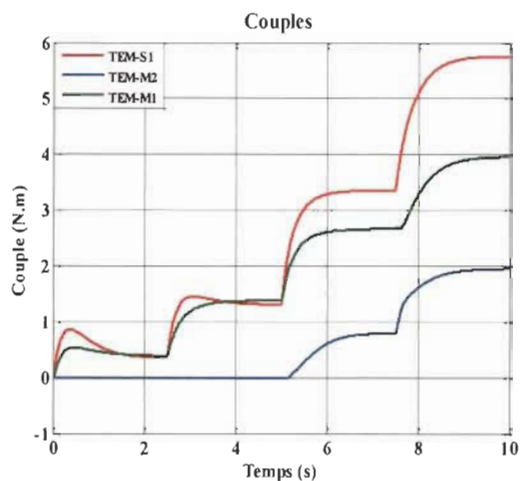


Figure 4-5 Caractéristiques des couples

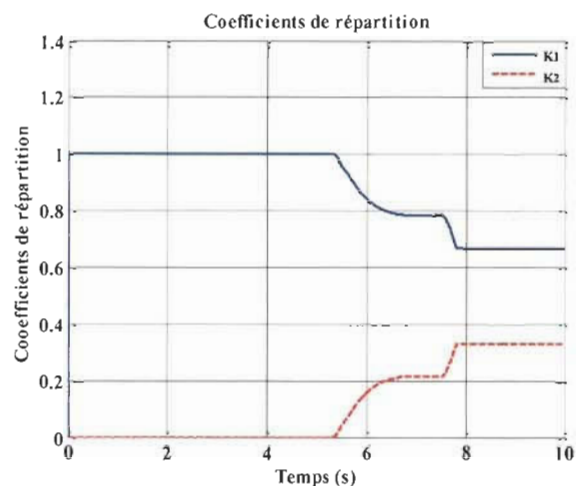


Figure 4-6 Coefficients de répartition

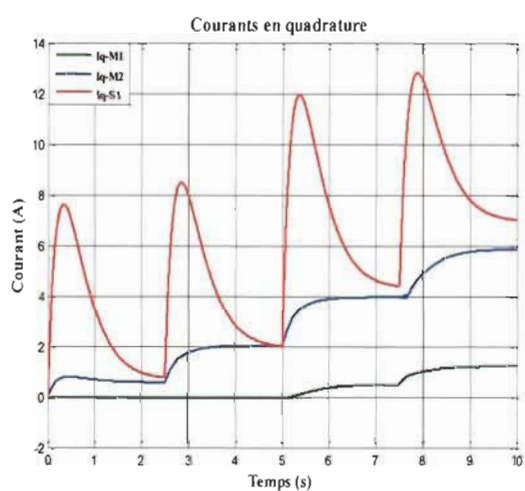
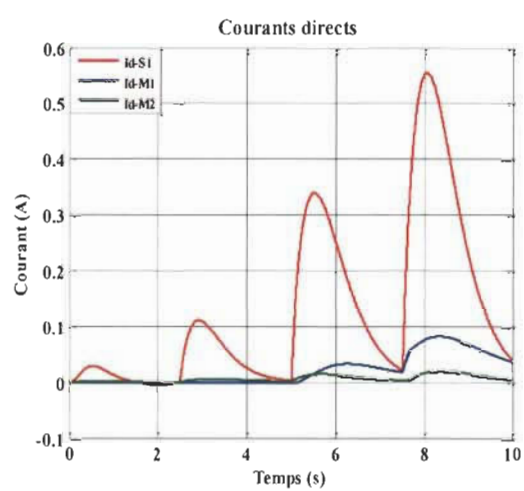
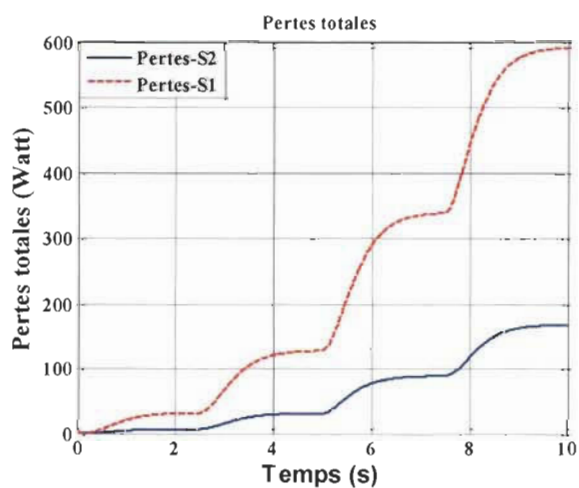
Figure 4-7 Courants I_q Figure 4-8 Courants I_d 

Figure 4-9 Pertes totales

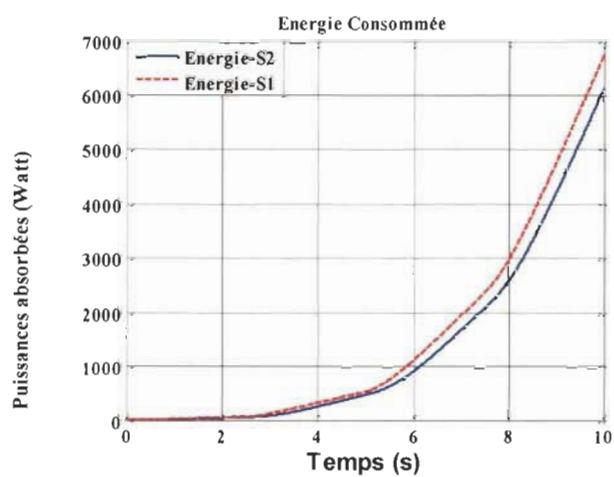


Figure 4-10 Énergie consommée

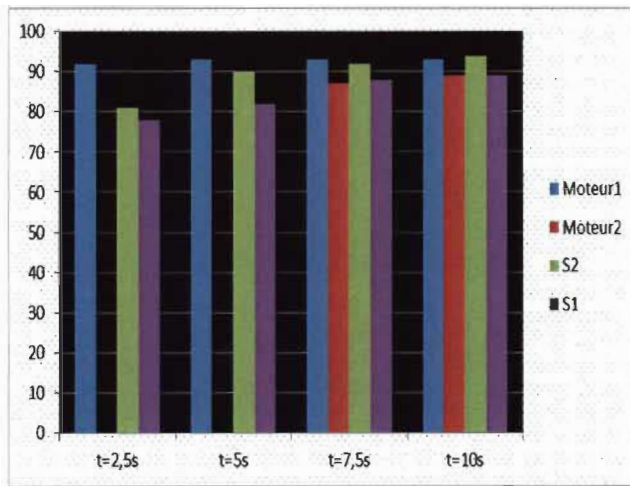


Figure 4-11 Rendements

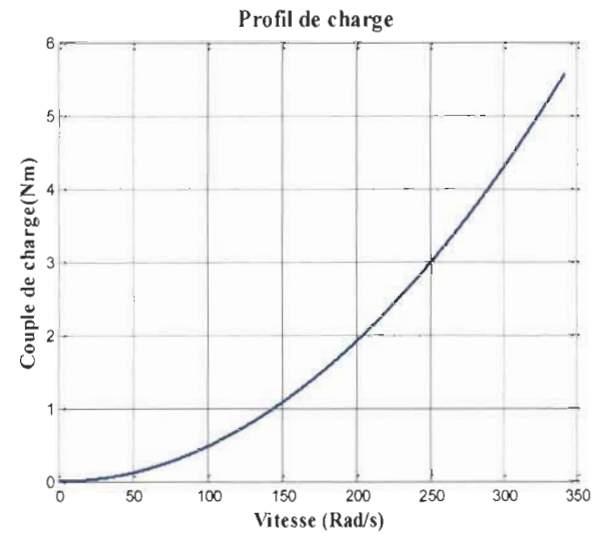


Figure 4-12 Couple de charge

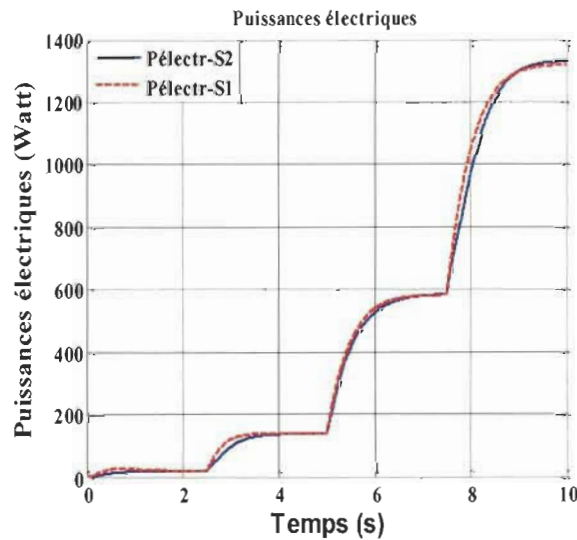


Figure 4-13 Puissances électriques

4.1.4 Discussion

Les résultats des simulations émergent des différences au niveau du comportement des deux systèmes d'entraînement sous le même profil de charge. Les résultats obtenus pour le système d'entraînement bi-machine montrent clairement l'effet de la stratégie floue de

répartition. Lorsque le couple total requis est dans la gamme dite petite, on note que seulement le premier moteur est utilisé pour le démarrage. Lorsque le couple résistant augmente et que le premier moteur se rapproche de son couple nominal ($4\text{N}\cdot\text{m}$), nous constatons l'activation du second moteur qui commence à produire un couple électromagnétique. Les deux moteurs partagent la charge selon les coefficients générés par l'algorithme flou (figure 4-6). Les courants tirés par les deux moteurs composant le système bi-moteur présentent des allures différentes (figure 4-7) et (figure 4-8), selon le pourcentage attribué à chacun des deux moteurs.

Il est démontré que c'est très intéressant de remplacer l'entraînement monomachine par celui bi-machine accompagné d'une stratégie qui assure une répartition efficace de la charge, chose que l'on peut constater dans la figure 4-11; la stratégie floue assure un fonctionnement à haut rendement du système global et de chacun des moteurs comparé avec le système monomoteur, une diminution considérable au niveau de la puissance dissipée sous forme de pertes (figure 4-9). Il faut noter que dans le cas de cette étude, la diminution des pertes est due d'une grande part aux paramètres des machines utilisées; le coefficient de friction de la machine S1 est plus grand que la somme des deux machines M1 et M2, les écarts des inerties aussi. Cela peut attirer l'attention sur les avantages qu'on peut tirer en remplaçant des entraînements classiques (monomachines) par des systèmes multimoteurs en choisissant judicieusement les moteurs équivalents.

Le système et la stratégie proposée assurent une réduction du taux de l'énergie consommée dans toutes les plages de fonctionnement (figure 4-10), ce qui est considéré comme étant un énorme avantage.

4.2 Algorithme de répartition des charges

Les algorithmes de répartition présentés dans les sections précédentes génèrent des coefficients proportionnels à la charge, et donc ce sont des valeurs numériques qui présentent des pourcentages du couple total requis.

La stratégie que l'on présente dans cette section est basée sur la connaissance des performances de chacun des moteurs, et sa spécification est de générer des coefficients de répartition de différentes valeurs dans le respect de la contrainte $K_i \leq 1$.

Ces coefficients contrairement aux autres obtenus à l'aide des différents algorithmes de répartition des forces ne sont pas appliqués directement à l'entrée de la commande (\widetilde{tem}) afin d'obtenir directement les entrées de réglage des divers actionneurs : tem_1^* , tem_2^* , et tem_3^* mais représentent des pourcentages des couples maximaux des machines et sont calculés en fonction de la plage où se situe le couple total requis, suivant un principe d'activation hiérarchique des moteurs, et donc (le deuxième moteur non activé tant que le premier n'a pas encore atteint son couple maximal)), quand c'est un seul moteur qui fonctionne; $k_1 = 1$, du moment que le deuxième soit activé; son coefficient devient: $k_2 = (\widetilde{tem} - tem_{1\max}) / tem_{2\max}$

(4-5)

$$\begin{cases} tem_1^* = k_1 tem_{1\max} \\ tem_2^* = k_2 tem_{2\max} \\ tem_3^* = k_3 tem_{3\max} \end{cases} \quad (4-6)$$

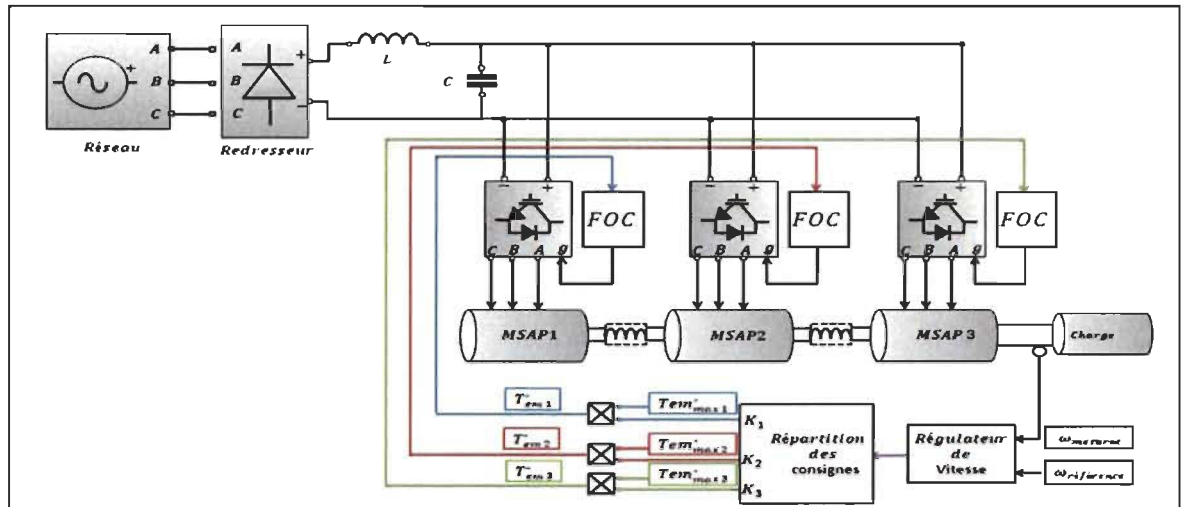


Figure 4-14 Schéma bloc du système d'entraînement avec la technique proposée

4.2.1 Tests et simulations

L'algorithme proposé fut utilisé pour assurer la répartition de la charge dans le système d'entraînement présenté dans le chapitre III; (les paramètres des moteurs sont donnés dans le tableau 3-1). Les performances du système sont comparées avec une répartition égale; pour ce fait une série de simulations a été réalisée dans l'environnement MATLAB®-Simulink™. L'algorithme d'intégration 'ode4 (Runge-Kutta)' est employé avec un pas de simulation constant égal à $1e - 5s$.

4.2.2 Résultats des simulations

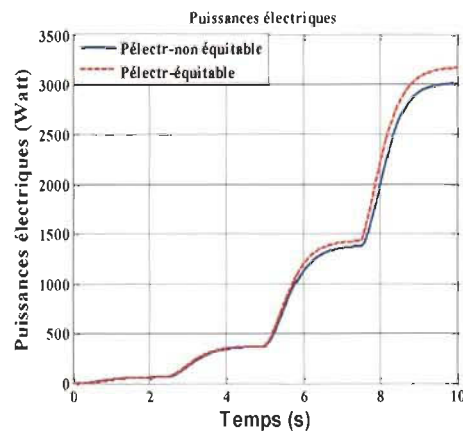
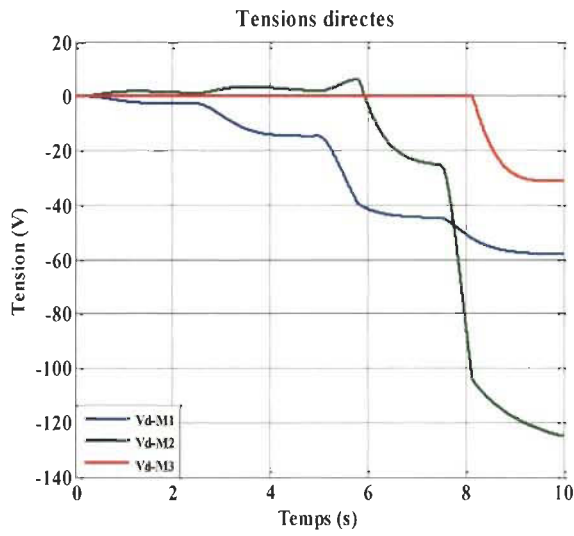
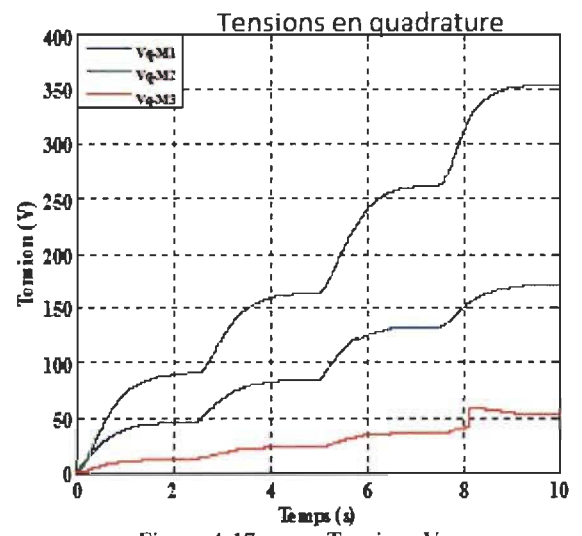
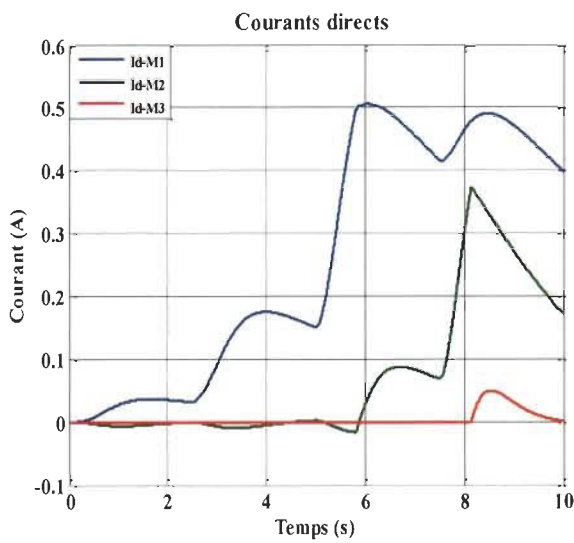
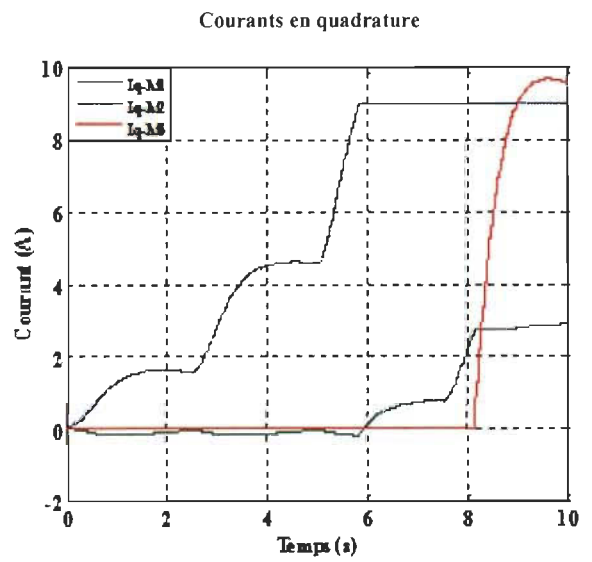


Figure 4-15 Puissances électriques

Figure 4-16 Tensions V_d Figure 4-17 Tensions V_q Figure 4-18 Courants I_d Figure 4-19 Courants I_q

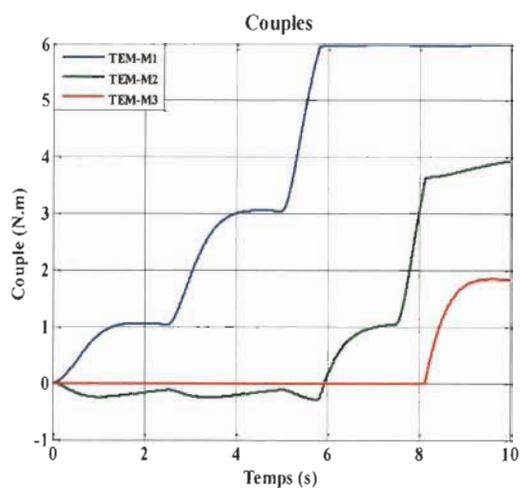


Figure 4-20 Caractéristiques des couples

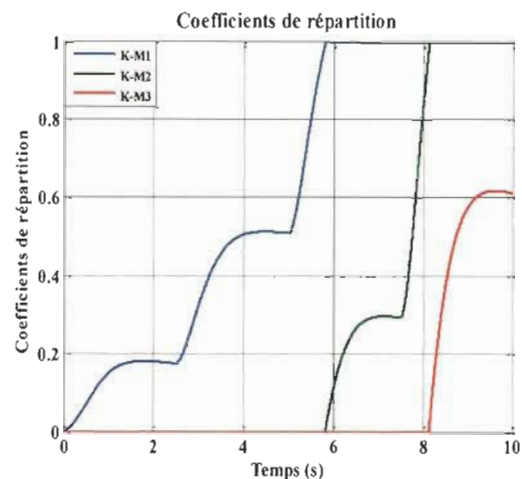


Figure 4-21 Coefficients de répartition

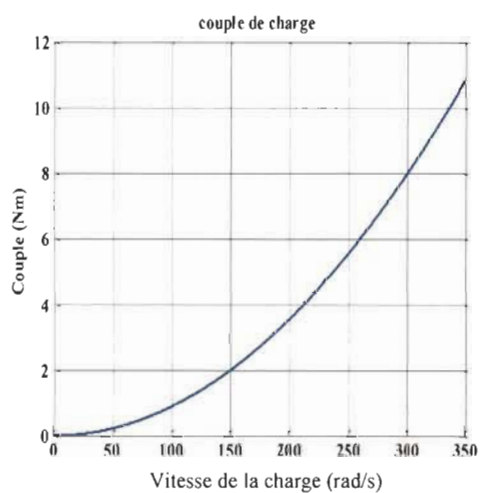


Figure 4-22 Profil de charge

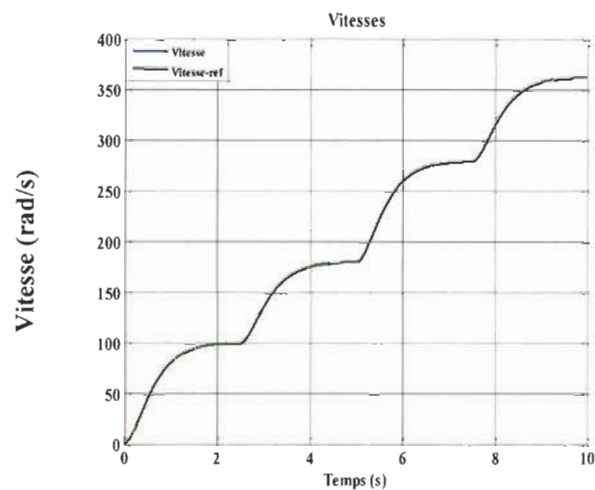


Figure 4-23 Caractéristique de la vitesse

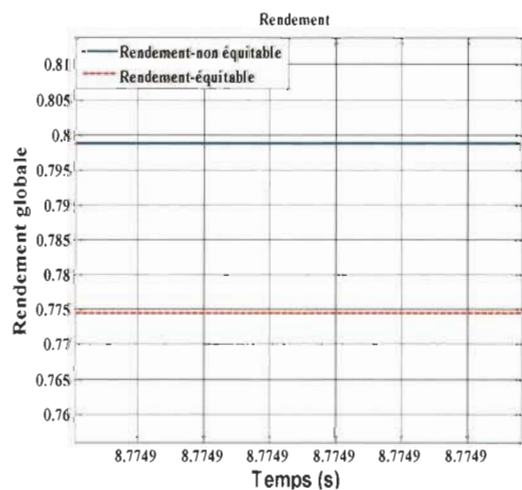


Figure 4-24 Rendements

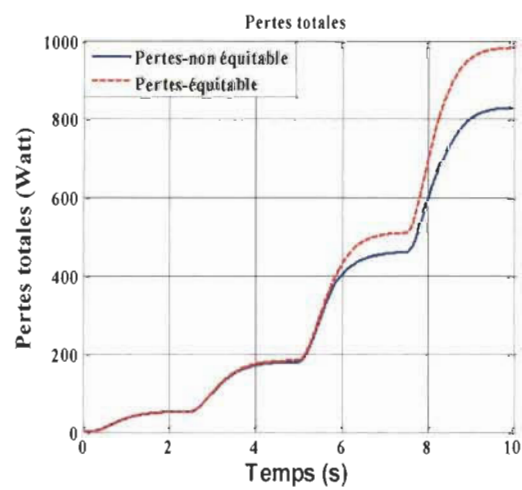


Figure 4-25 Pertes totales

4.2.3 Discussion

Les résultats des simulations traduisent la logique de l'algorithme de répartition proposé, les différences marquées concernant le tirage des courants par les moteurs (figures 4-18, et 4-19) qui sont dues à la répartition non équitable de la charge entre les trois moteurs. La figure 4-21 permet de constater que les coefficients de répartition sont à l'image des couples électromagnétiques contrairement aux coefficients obtenus par les autres algorithmes : une fois générés, ils sont multipliés par des constantes qui représentent les valeurs numériques des couples nominaux de chacune des machines. Les figures 4-24, 4-25, et 4-15 démontrent la supériorité de la stratégie proposée par rapport à une répartition équitable en matière de minimisation des pertes dans le système d'entraînement, et de la puissance électrique; on remarque aussi l'amélioration du rendement global.

4.3 Répartition des forces dans un système multimoteur avec la charge placée au milieu des moteurs d'entraînement

Jusqu'à cette phase, les stratégies de répartition proposées et étudiées ont été appliquées sur la topologie multimachine où les moteurs sont directement liés par des liens flexibles et que la charge est placée à la fin de la chaîne.

Dans cette section on présente la structure où la charge est placée entre les deux moteurs d'entraînement, une structure que l'on trouve souvent dans les machines-outils, figure 4-26. Les travaux qui traitent le sujet sont focalisés plus sur les structures des lois de commande (maître esclave) par exemple, avec comme objectif l'amélioration des performances des régulateurs dans le but de donner plus de robustesse et assurer la stabilité du système [37].

Dans notre cas, nous nous focalisons sur l'aspect énergétique de la topologie en inspectant l'utilité de remplacer un entraînement monomoteur par un système bimoteur dont la charge placée au milieu est partagée de façon équitable, figure 4-27.

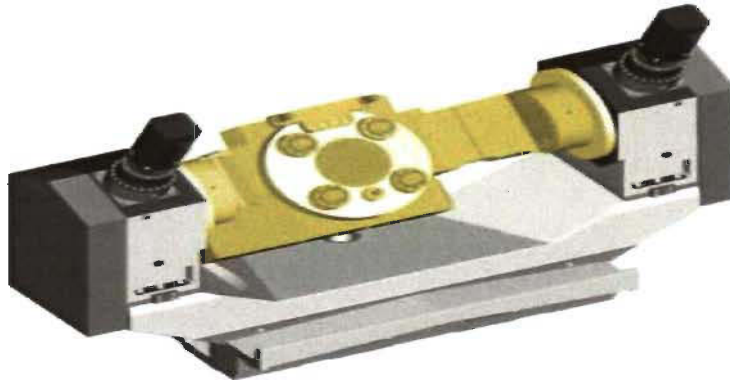


Figure 4-26 Modèle physique d'un axe de pivotement rotatif [6]

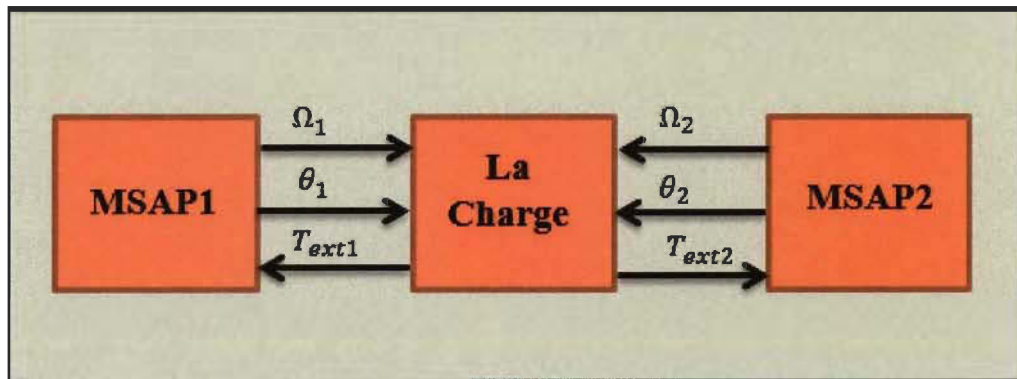


Figure 4-27 Schéma explicite de la topologie proposée

4.3.1 Tests et simulations

L'évaluation de l'efficacité de la topologie en question passe par la comparaison des performances du système d'entraînement proposé (symbolisé par S2) avec un entraînement monomachine équivalent (S1). Pour ce faire, une série de simulations a été réalisée dans

l'environnement MATLAB®-Simulink™ en employant l'algorithme d'intégration 'ode4 (Runge-Kutta)' avec un pas de simulation de $1e^{-5}$ s. La charge est répartie entre les deux moteurs de façon égale.

Les paramètres des moteurs utilisés dans cette étude sont donnés dans le tableau 4-4.

4.3.2 Résultats des simulations

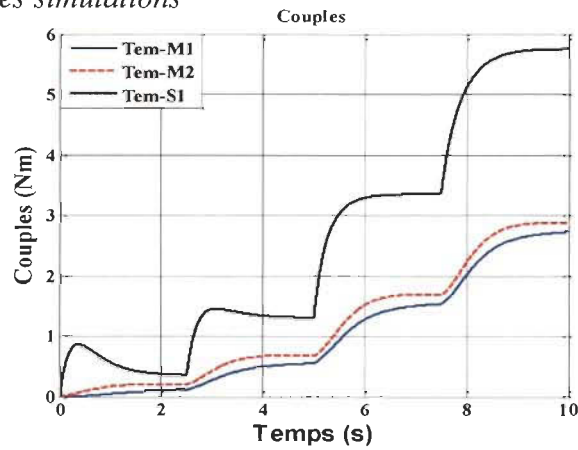


Figure 4-28 Caractéristiques des couples

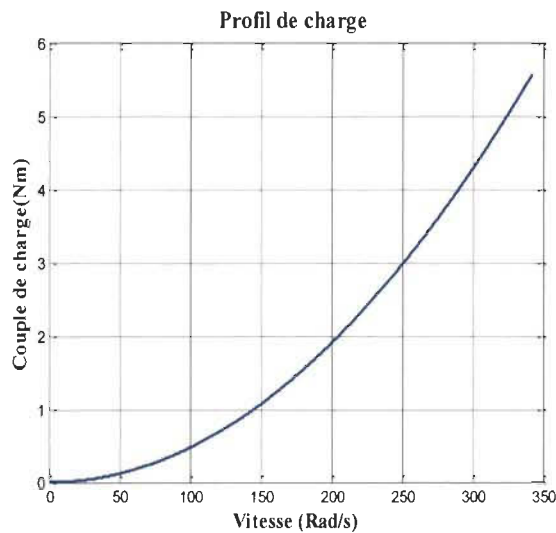


Figure 4-29 Couple de charge

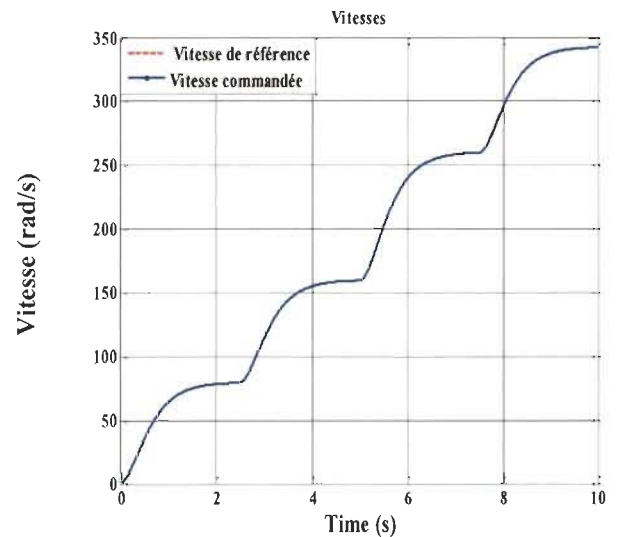


Figure 4-30 Caractéristique de la vitesse (S2)

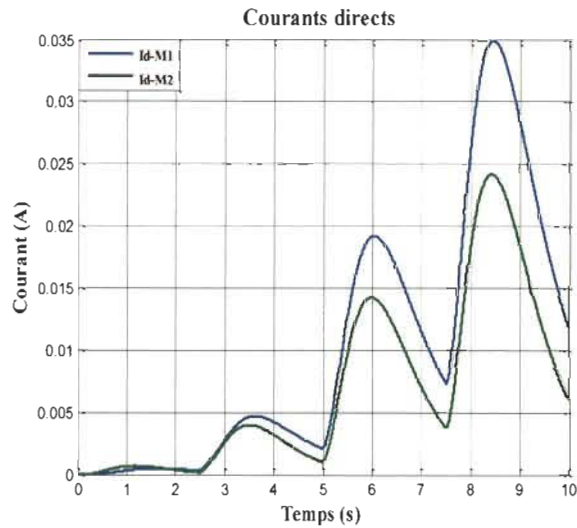


Figure 4-31 Courants Id

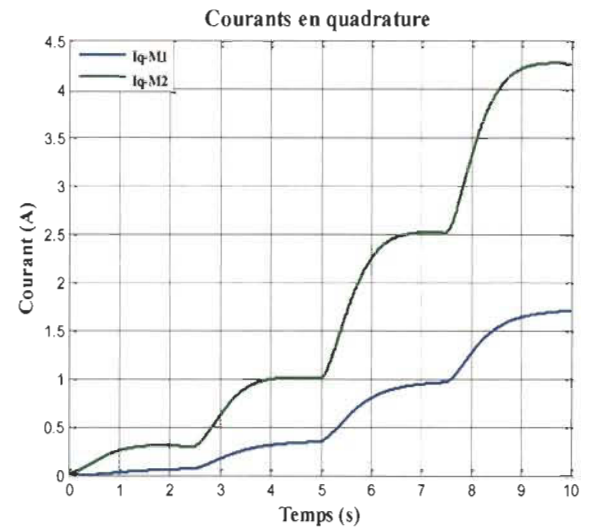


Figure 4-32 Courants Iq

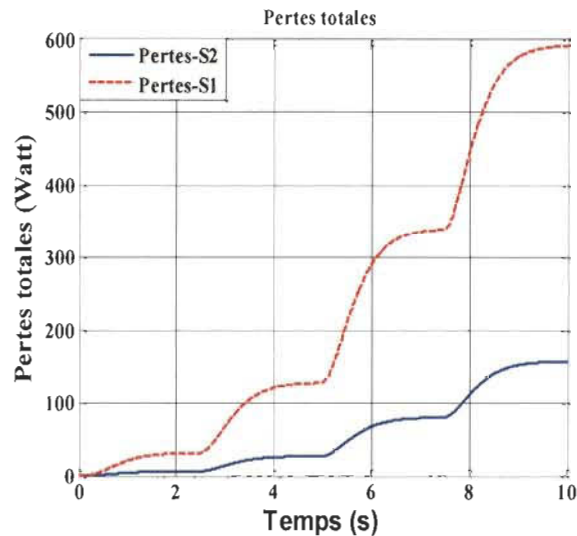


Figure 4-33 Pertes totales

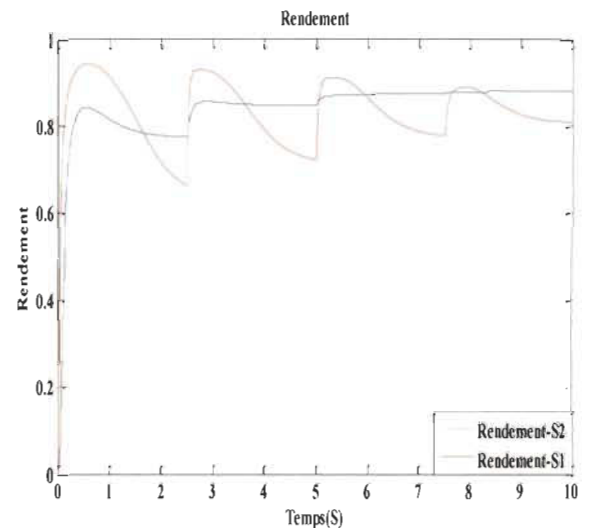


Figure 4-34 Rendement

4.3.3 Discussion

Les résultats des simulations démontrent la force de la loi de commande. La figure 4-30 montre que la vitesse commandée suit parfaitement sa référence, sans noter les effets nuisibles des vibrations dues aux termes des couplages entre les moteurs d'entraînement et la charge sur les signaux obtenus.

Les courants et les tensions des deux moteurs qui composent le système d'entraînement présentent des comportements différents malgré le fait que la charge soit équitablement partagée et cela est dû au fait qu'ils ne soient pas identiques.

La charge est partagée de façon égale entre les deux moteurs, donc on se trouve dans le cas d'une répartition équitable.

Le changement de la topologie du système multimachine ne diminue pas de sa supériorité par rapport à un entraînement monomachine équivalent. Les figures 4-33 et 4-34 démontrent les avantages de la structure proposée en matière de minimisation des pertes et de l'amélioration du rendement du système d'entraînement.

4.4 Conclusion

Il est proposé de remplacer certains entraînements monomachines par des systèmes multimachines, mais la question primordiale à poser fut de vérifier s'il serait bénéfique d'établir un tel changement surtout avec la complexité apportée par la proposition. La réponse été établie dans ce chapitre en proposant des stratégies de répartition des forces qui apportent d'énormes avantages en matière d'économie d'énergie et de diminution des pertes.

Chapitre 5 - Répartition de la puissance à base de la technique de commande *Direct Power Control* (DPC) et optimisation avec les algorithmes génétiques

Tout comme la majorité des travaux qui traitent le problème de la répartition des forces, le partage de la charge entre les actionneurs est traduit par une distribution du couple électromagnétique total requis. Dans cette partie nous introduisons un nouvel aspect du partage des forces qui consiste à assurer la distribution de la puissance requise par la charge où les entrées de commande pour les moteurs deviennent par conséquent les puissances utiles de référence.

Commander les moteurs en puissance nous emmène droit vers la technique de commande dite commande directe de la puissance (*Direct Power Control*) (DPC).

5.1 Répartition des puissances dans les systèmes multimoteurs

Toute charge impose au système d'entraînement une certaine puissance, qui est le produit instantané de la vitesse de rotation et du couple électromagnétique. La répartition de cette grandeur implique qu'elle soit commandée, ce qui nous conduit à établir un contrôle direct de la puissance des moteurs afin que chacune des machines fournisse sa propre puissance désirée imposée par la stratégie de répartition.

5.1.1 Principe de la Commande directe de la puissance du moteur asynchrone

La loi de commande proposée est inspirée de la commande directe du couple; ou *Direct Torque Control* (DTC), ayant un principe basé essentiellement sur la connaissance de la position du flux de la machine dans l'espace vectoriel; cette technique permet de commander la puissance utile de la machine par la génération des tensions statoriques adéquates par l'onduleur. Nous avons choisi d'utiliser des machines asynchrones dans cette étude pour la raison que la commande de la puissance de ce type est beaucoup plus complexe que celle des machines synchrones à aimants permanents.

5.1.2 Estimation du couple électromagnétique et du flux de la machine

Étant donné que les grandeurs à contrôler soient le produit de la vitesse et du couple électromagnétique, ainsi que les deux composantes du flux de la machine (flux statorique et rotorique), il est primordial de les estimer mathématiquement.

Le couple électromagnétique peut être calculé à partir des composantes directes et en quadrature du flux estimé, et des courants statoriques mesurés selon la formule :

$$T_{em} = \frac{3}{2} p (\varphi_{sd} I_{sq} - \varphi_{sq} I_{sd}) \quad (5-1)$$

Le vecteur de flux de la machine peut être estimé à l'aide des équations des tensions statoriques de la modélisation du moteur asynchrone et peut être exprimé par la formule :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = \int (V_{sd} - R_s I_{sd}) dt \\ \varphi_{sq} = \int (V_{sq} - R_s I_{sq}) dt \end{cases} \quad (5-2)$$

où φ_{sd} , φ_{sq} , V_{sd} , V_{sq} , I_{sd} , I_{sq} sont respectivement les flux, tensions et courants statoriques dans le repère de Park.

5.1.3 Structure du contrôle

La loi de commande est composée de certaines étapes dont l'enchaînement aboutit au choix du vecteur de tension \bar{V}_s convenable. Cette opération dépend de la position du vecteur du flux statorique $\overline{\Phi}_s$, de la variation de son module et de son sens de rotation, ainsi que de la dynamique du couple électromagnétique [38, 39].

L'espace dans lequel le vecteur du flux statorique se déplace est composé en six zones :

$$\begin{aligned} S1 &\rightarrow \text{Secteur 1: } \alpha(1) \in \left(-\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{6}\right); \\ S2 &\rightarrow \text{Secteur 2: } \alpha(2) \in \left(+\frac{\pi}{6}, \frac{\pi}{2}\right); \\ S3 &\rightarrow \text{Secteur 3: } \alpha(3) \in \left(+\frac{\pi}{2}, \frac{5\pi}{6}\right); \\ S4 &\rightarrow \text{Secteur 4: } \alpha(4) \in \left(\frac{5\pi}{6}, -\frac{5\pi}{6}\right); \\ S5 &\rightarrow \text{Secteur 5: } \alpha(5) \in \left(-\frac{5\pi}{6}, -\frac{\pi}{2}\right); \\ S6 &\rightarrow \text{Secteur 6: } \alpha(6) \in \left(-\frac{\pi}{2}, -\frac{\pi}{6}\right). \end{aligned}$$

Le contrôle de la vitesse est assuré par un régulateur PI. Quant à la puissance et au flux; des correcteurs basés sur le principe de comparaison à seuil sont utilisés afin de les maintenir dans la bande souhaitée; ces correcteurs génèrent des variables logiques.

$EP_{ut}= 1$: lorsque l'erreur de la puissance est positive.

$EP_{ut}= 0$: lorsque l'erreur de la puissance est négative.

Concernant le correcteur à trois niveaux, la sortie peut être -1,0 ou +1.

$E\phi_s = -1$: La grandeur est plus petite que la limite inférieure de la bande.

$E\phi_s = 0$: La grandeur est à l'intérieur de la bande.

$E\phi_s = +1$: La grandeur est plus grande que la limite supérieure de la bande.

Tableau 5-1 Table de commande

S		1	2	3	4	5	6
$E\phi_s = 0$	$EP_{ut} = 1$	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	$EP_{ut} = 0$	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	$EP_{ut} = -1$	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
$E\phi_s = 1$	$EP_{ut} = 1$	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	$EP_{ut} = 0$	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	$EP_{ut} = -1$	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

5.1.4 Tests et simulations

Les performances de la loi de commande proposée et sa compatibilité avec les objectifs désignés pour ce projet sont vérifiées par une série de simulations dans l'environnement MATLAB-Simulink d'une durée de $t = 1s$, ayant comme méthode de calcul l'algorithme d'intégration 'ode4 (Runge-Kutta)' et « Fixed-step » avec un pas de simulation égale à $1e - 5s$.

Le système étudié est composé de trois moteurs asynchrones identiques rigidement couplés; un choix inspiré de la simple volonté d'aborder les deux types des machines les plus répondues actuellement, les paramètres des moteurs utilisés dans cette étude sont donnés dans le tableau 5-2.

Tableau 5-2 Paramètres des moteurs pour la répartition avec DPC

Paramètres	Valeurs
Inductance rotorique(H)	0.274
Inductance statorique(H)	0.274
Résistance statorique (Ω)	4.85
Résistance rotorique (Wb)	3.805
Inertie ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)	0.0031
Nombre de paires de pôles	2

5.1.5 Résultats des simulations

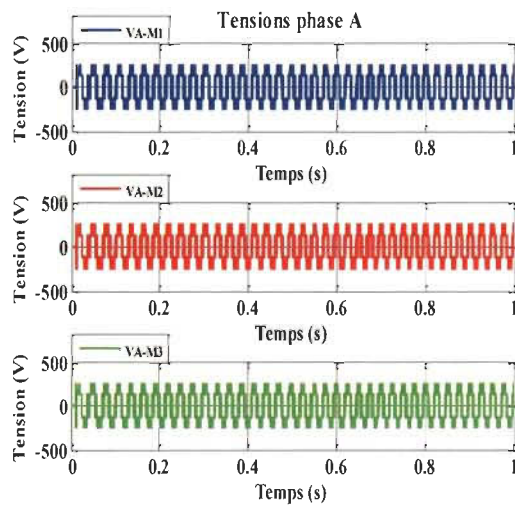


Figure 5-1 Tension Va

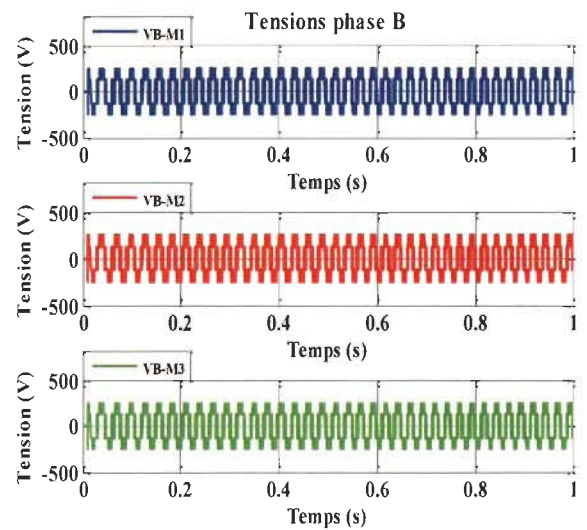


Figure 5-2 Tension Vb

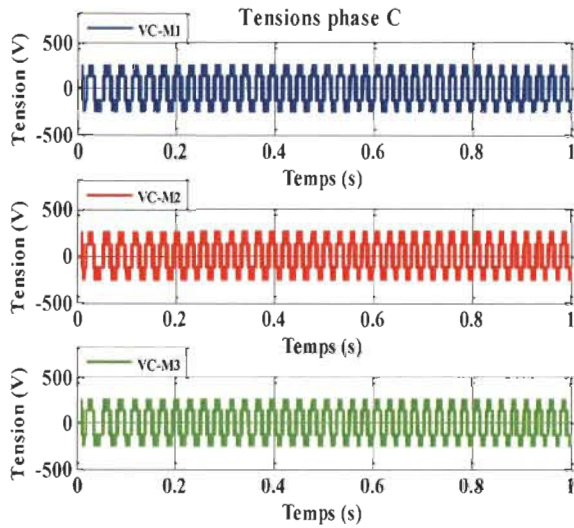


Figure 5-3 Tension Vc

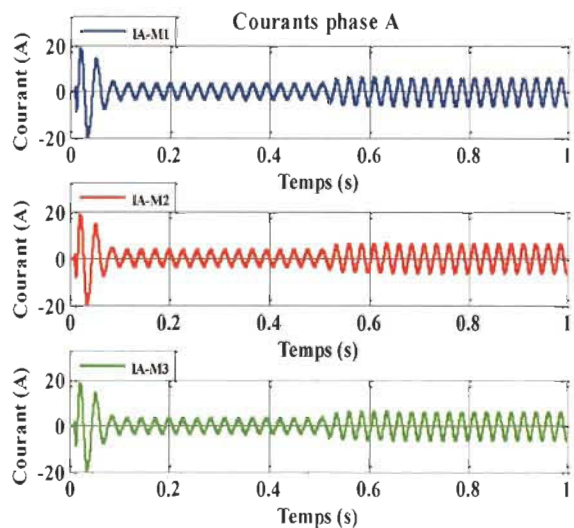


Figure 5-4 Courant Ia

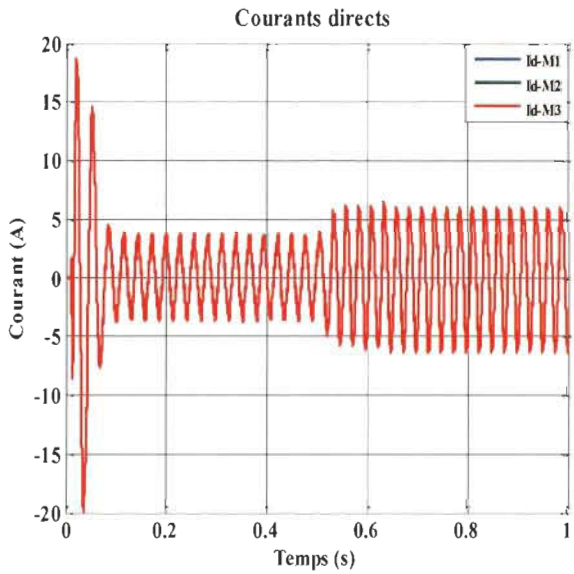


Figure 5-5 Courants Id

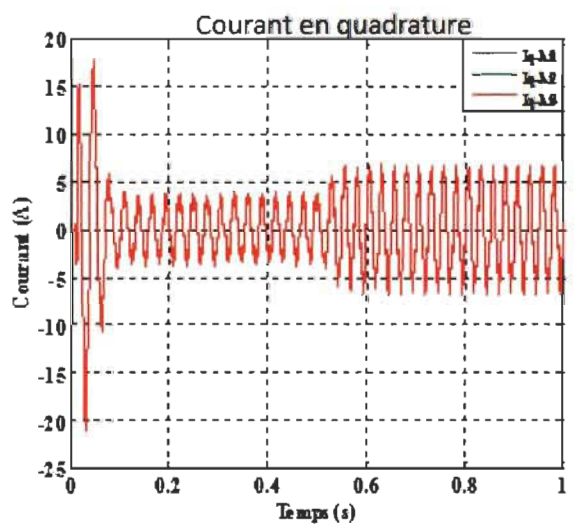


Figure 5-6 Courant Iq

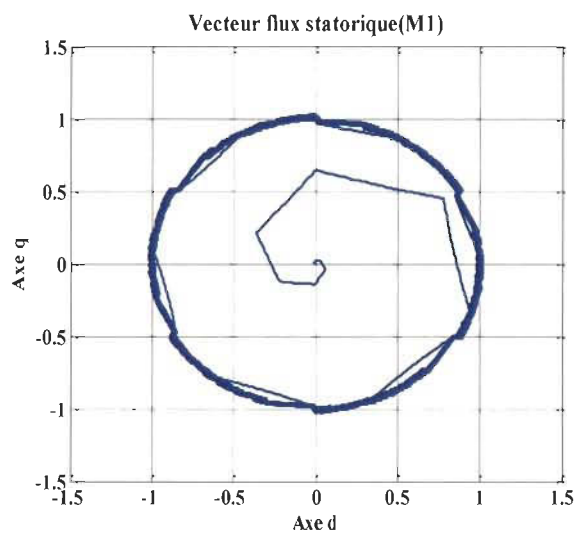


Figure 5-7 Vecteur du flux statorique (M1)

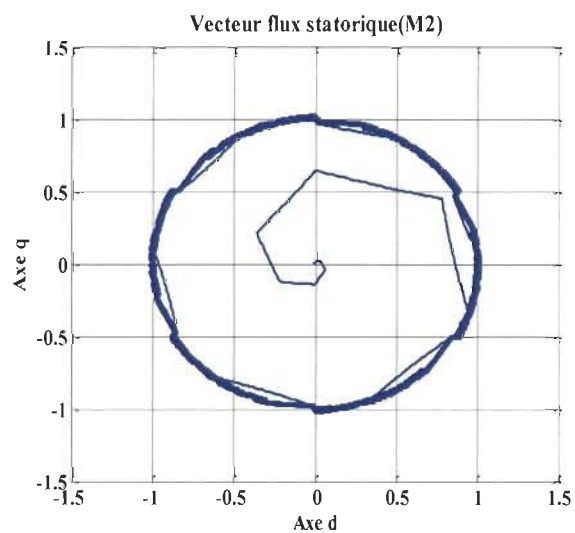


Figure 5-8 Vecteur du flux statorique (M2)

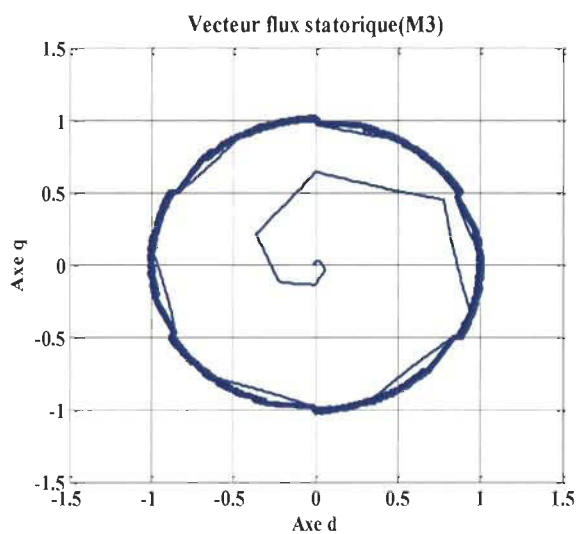


Figure 5-9 Vecteur du flux statorique (M3)

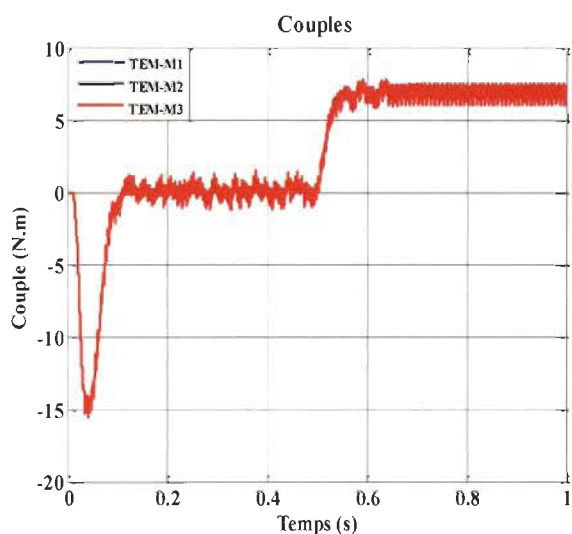


Figure 5-10 Caractéristiques des couples

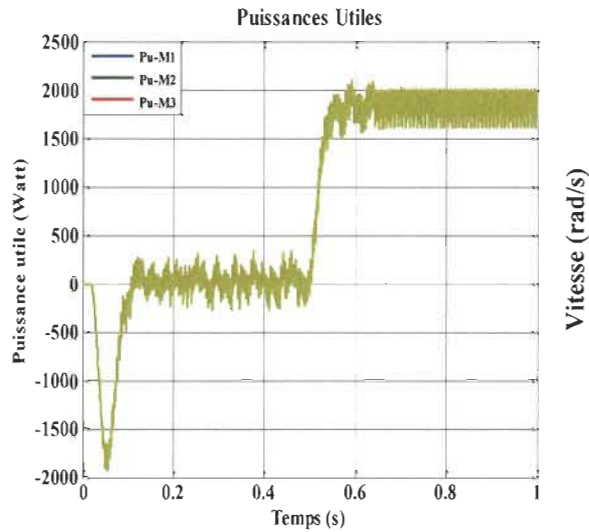


Figure 5-11 Puissances utiles

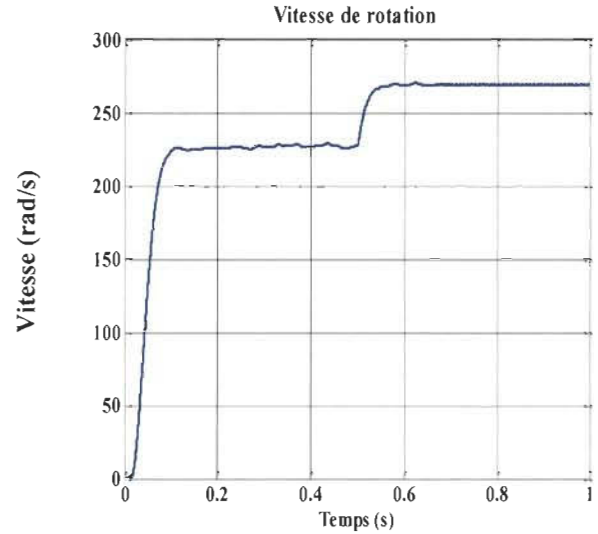


Figure 5-12 Vitesse de la charge

5.1.6 Discussion

Les figures 5-1, 5-2 et 5-3 présentent les tensions d'alimentation triphasées V_a , V_b , et V_c des trois machines qui prennent pas une forme sinusoïdale; cela est dû au fait que les tensions de commande sont de forme vectorielle imposées par la table de commutation.

Les figures 5-4, 5-5 et 5-6 montrent que les courants de phase A des trois machines sont similaires en phase et en amplitude à cause du fait que les trois moteurs sont identiques et que la répartition est équitable et que le type du couplage soit rigide.

La figure 5-10 montre l'allure des couples électromagnétiques des machines qui sont similaires à cause du fait que les machines soient identiques, on remarque ainsi des ondulations au niveau de cette grandeur qui sont dues au contrôle par comparaison à seuil.

Les figures 5-7, 5-8 et 5-9 présentent le flux statorique ϕ_s dans le plan complexe. Le flux démarre du point (0,0) et tourne dans le sens horaire pour suivre un cercle de rayon 1 Wb (flux de consigne) tout en restant l'intérieur de la bande.

La figure 5-11 présente les puissances utiles fournies par les machines; ces grandeurs sont identiques à cause de la répartition équitable de la puissance requise par la charge.

5.2 Optimisation des régulateurs et répartition de la charge par les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques (AG) sont des sous-classes de la famille des algorithmes évolutionnaires développés par le Pr Holland. De nos jours, ils sont considérés comme étant une technique de recherche puissante au service de diverses filières d'ingénierie.

Les (AG) sont largement utilisés pour apporter des solutions pour les problèmes d'optimisation.

Le fonctionnement des (AG) est inspiré du principe naturel de la survie du plus fort. Le processus d'optimisation commence par la génération aléatoire d'une population qui se compose d'un ensemble de chromosomes. Une fois que la population aléatoire est obtenue, la solution représentée par chaque chaîne doit être évaluée. La fonction objectif est responsable de l'évaluation de la solution à chaque étape.

5.2.1 Optimisation des paramètres des régulateurs par les algorithmes génétiques

Les lois de commandes utilisées pour assurer le contrôle des systèmes proposés dans ce travail sont menées de régulateurs dont les paramètres sont optimisés par des AG selon un critère ITAE augmenté; la fonction objective utilisée pour ce fait est donc décrite par la formule:

$$Fitness(1) = \int_0^t |e| dt + \int_{t_0}^t k |\dot{e}| dt \quad (5-3)$$

où e et \dot{e} sont respectivement l'erreur et sa dérivée. Un terme a été ajouté au critère ITAE afin de pénaliser les oscillations de vitesse.

Dans cette partie, nous avons utilisé les algorithmes génétiques pour optimiser la

consommation en énergie des systèmes d'entraînement en optimisant les paramètres des régulateurs dans la loi de commande selon une fonction objective composée de deux critères (ITAE et énergies) et en introduisant un critère de pondération γ .

Les paramètres de tous les régulateurs (régulateurs des couples et des courants) dans le système sont calculés par l'algorithme génétique selon un critère d'énergie et ITAE combiné (5-4); seuls les régulateurs des vitesses sont calculés selon le critère ITAE seulement.

La fonction objective complète devient donc:

$$Fitness(1') = (1 - \gamma) \cdot \left(\int_0^t |e| dt + \int_{t_0}^t k |\dot{e}| dt \right) + \gamma \int_0^t |w \cdot T_{em}| dt \quad (5-4)$$

La première étape est de mettre $\gamma = 0$ et lancer l'algorithme génétique, la première génération est donc obtenue selon le critère ITAE augmenté; une fois que les paramètres sont ajustés la sélection se fait selon le critère énergie.

$$Fitness(2) = \int_0^t |w \cdot T_{em}| dt \quad (5-5)$$

Où T_{em} est le couple total requis par la charge.

A. Tests et simulations

Afin de vérifier les performances de la technique d'optimisation proposée, on a pris le système d'entraînement décrit dans la section 4-1 avec la stratégie de répartition à base de la logique floue comme modèle de test, les paramètres des régulateurs de la loi de commande ont été optimisés par un algorithme génétique selon le principe décrit en haut.

B. Résultats des simulations

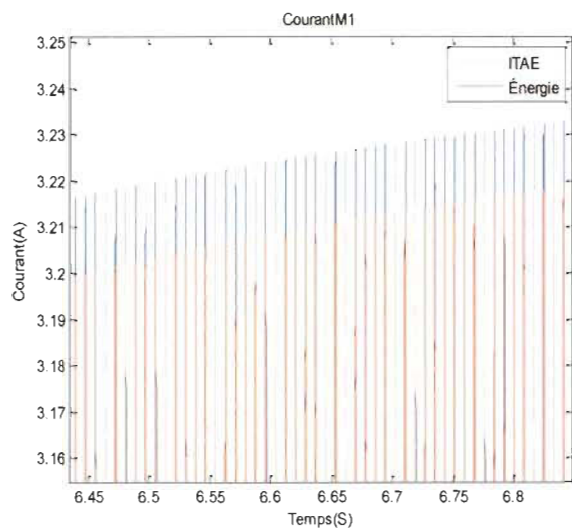


Figure 5-13 Courant Ia (M1)

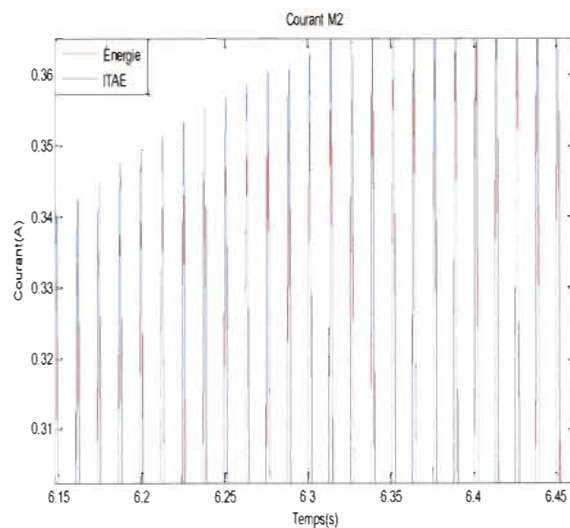


Figure 5-14 Courant Ia (M2)

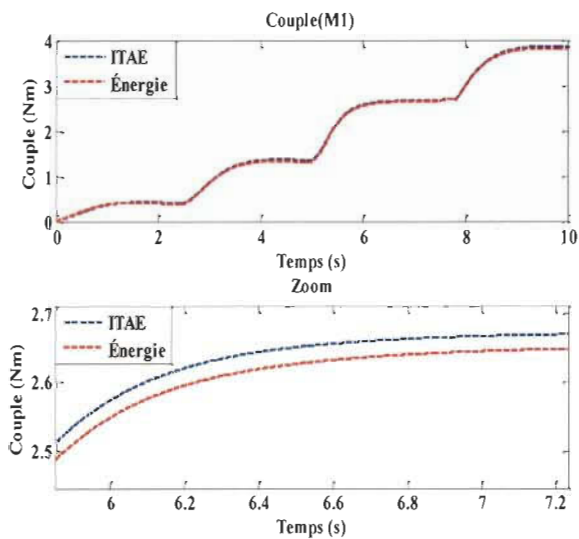


Figure 5-15 Caractéristique du couple (M1)

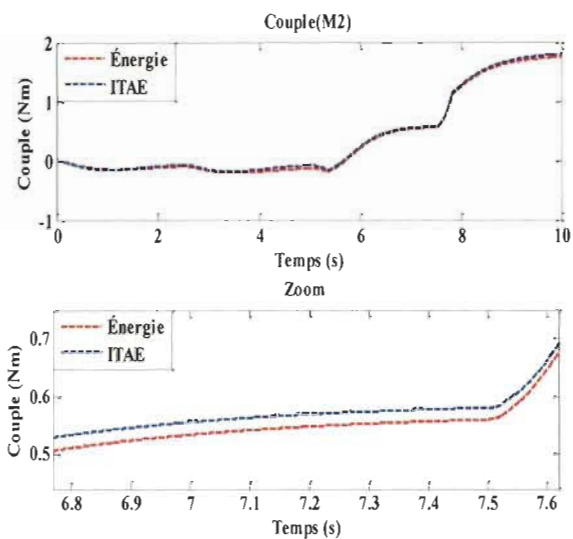


Figure 5-16 Caractéristique du couple (M2)

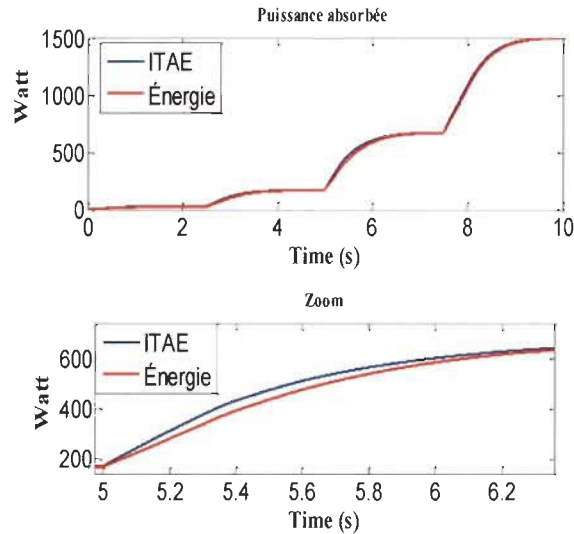


Figure 5-17 Puissance absorbée

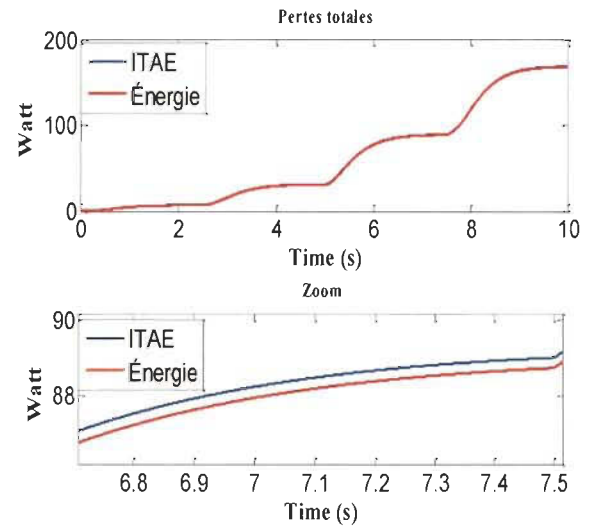


Figure 5-18 Pertes totales

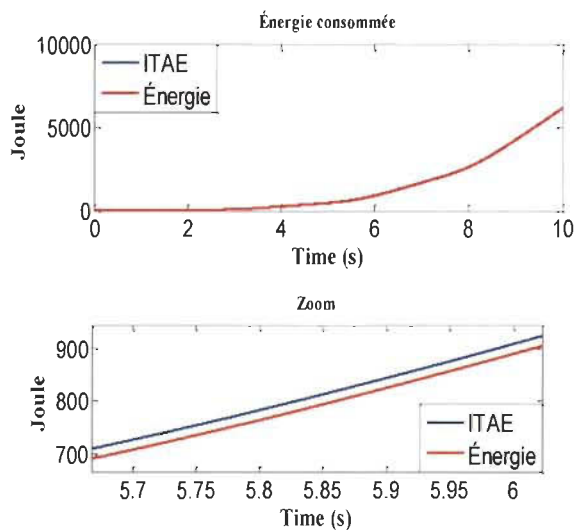


Figure 5-19 Énergie consommée

C. Discussion

Les résultats des simulations démontrent les avantages apportés par l'optimisation des paramètres des régulateurs de la loi de commande par les algorithmes génétiques en matière d'économie d'énergie consommée par le système d'entraînement. Les figures 5-13 et 5-14 illustrent l'effet de l'optimisation traduit par la minimisation des courants des moteurs d'entraînement. Les figures 5-15 et 5-16 montrent une diminution au niveau des amplitudes

des couples électromagnétiques fournis par les machines. Les figures 5-17, 5-18 et 5-19 démontrent clairement l'intérêt d'opter pour une telle technique dont les résultats montrent une optimisation des puissances absorbées et dissipées par le système d'entraînement ainsi qu'une réduction de la consommation en énergie.

5.2.2 Répartition des charges à base des algorithmes génétiques

La recherche du moyen le plus efficace énergétiquement possible nous a conduit à se demander si c'est possible d'établir une stratégie de répartition des forces basée sur les algorithmes génétiques, bien qu'au contraire de la stratégie à base de la logique floue considérée comme étant une répartition dynamique, les AG offrent des résultats hors-ligne. Pour ce faire, on doit prendre en considération le profil de la charge à entraîner, soit l'intervalle dans lequel varie sa courbe caractéristique et sa dynamique. À partir de ces données, l'algorithme génétique peut fournir les coefficients de répartition attribués à chacun des moteurs d'entraînement. La combinaison des coefficients est sélectionnée de manière à être celle qui assure le plus d'efficacité énergétique selon la fonction objective :

$$Fitness = \int_0^t |w \cdot T_{em}| dt \quad (5-6)$$

A. Tests et simulations

Les performances de la stratégie proposée sont vérifiées à l'aide d'une comparaison avec la stratégie basée sur la logique floue et une série de simulations a été réalisée dans l'environnement MATLAB-SIMULINK. Les deux stratégies sont appliquées sur le système décrit dans la section 4-1 sous les mêmes conditions.

B. Résultats des simulations

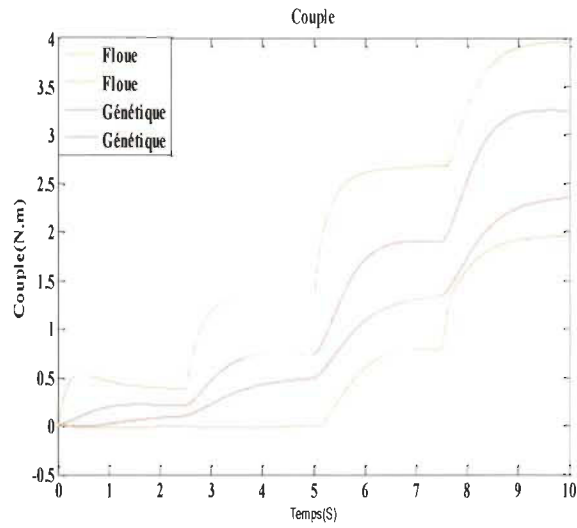


Figure 5-20 Caractéristiques des couples

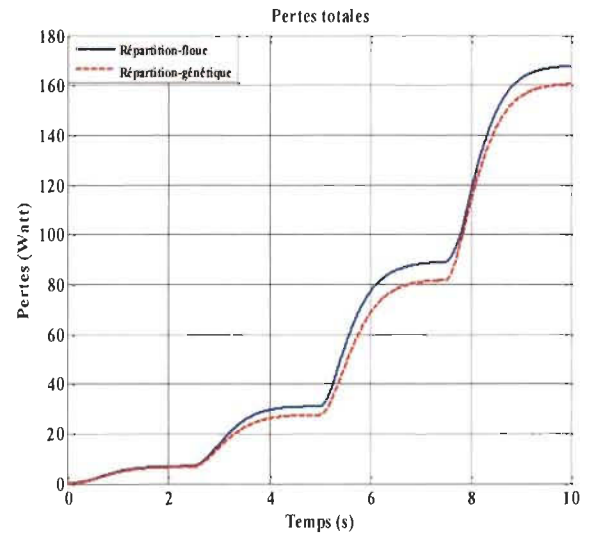


Figure 5-21 Pertes totales

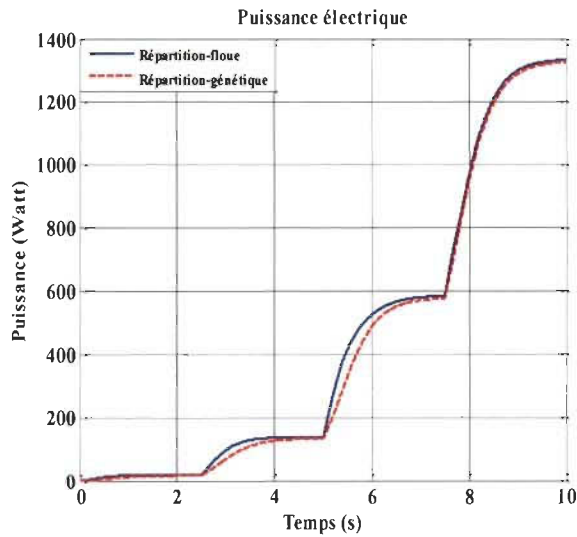


Figure 5-22 Puissances électriques

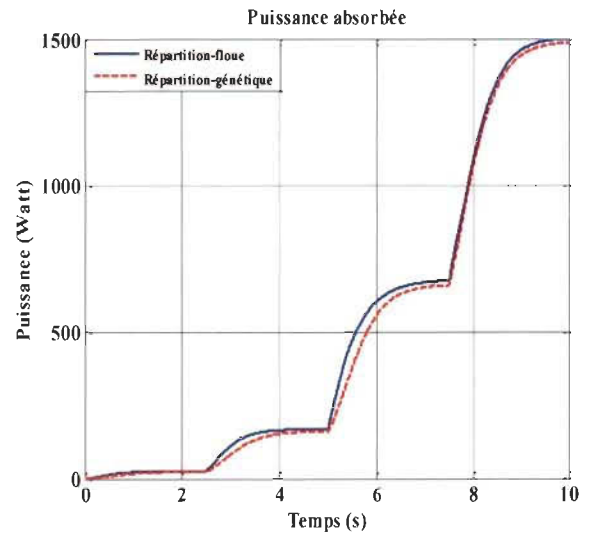


Figure 5-23 Puissances absorbés

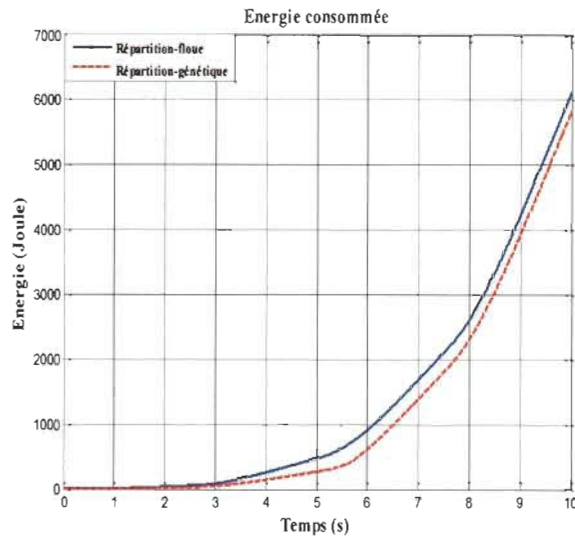


Figure 5-24 Énergie consommée

C. Interprétation

Les figures appuient l'hypothèse sur les avantages que l'on peut tirer en concevant une stratégie de répartition des charges à base des algorithmes génétiques en matière d'efficacité énergétique. La figure 5-20 montre les différences au niveau des caractéristiques des couples électromagnétiques fournies par les moteurs sous les deux stratégies (floue et génétique). Les figures 5-21, 5-22, 5-23 et 5-24 confirment les avantages tirés par la technique proposée, comparé à la stratégie à base de la logique floue. L'AG permet de sauver plus d'énergie, de réduire les pertes dans le system d'entraînement, et de la puissance absorbée pour l'entraînement de la charge. En fait, ça démontre que l'AG permet de trouver une meilleure solution que ce qui a été trouvé par les règles établies pour la logique floue d'un point de vue énergétique. Le couple total est plus faible avec l'AG pour la même charge, ceci veut dire que la vitesse sera aussi plus faible. Ceci réduit les pertes et l'énergie consommée. L'amélioration est donc due en bonne partie à une perte des performances du système (erreur stationnaire, régime dynamique plus lent).

Un très bon résultat serait d'appliquer l'AG pour déterminer les termes des tables d'inférences de la logique floue.

5.3 Conclusion

Nous avons essayé d'attribuer à l'aspect de la répartition des charges des approches innovantes en répondant à une problématique souvent rencontrée qu'est la distribution de la puissance requise par la charge entre les moteurs d'entraînement. Pour cela, la commande vectorielle utilisée pour le contrôle des systèmes lors des chapitres précédents a été remplacée par la DPC, une technique couramment utilisée pour la commande des génératrices dédiée pour les applications en éolienne. Nous avons montré dans la première partie de ce chapitre la possibilité de distribuer la puissance imposée par la charge entre les moteurs d'entraînement.

La deuxième partie était consacrée en premier lieu à l'introduction des algorithmes génétiques comme outil performant servant à l'optimisation des paramètres des régulateurs dans les différentes lois de commandes utilisées dans ce travail selon un critère ITAE modifié afin que les lois de commande puissent atteindre d'excellentes performances. Un autre critère servant à optimiser la consommation en énergie fut introduite; les deux critères sont combinés à l'aide d'un critère de pondération.

Cette technique permet d'atteindre d'excellents niveaux d'efficacité illustrés par la stabilité des lois de commande qui répondent aux perturbations engendrées par la complexité du système ainsi qu'une optimisation de la consommation en énergie due à une diminution des performances du système.

Chapitre 6 - Conclusion générale et recommandations

La thématique de notre projet de recherche porte sur la conception des stratégies de répartition des charges dans les systèmes électromécaniques couplés et vue la complexité de tels procédés, cela révèle beaucoup de défis en matière de gérer les enjeux dans le système d'entraînement. Pour ce fait une attention particulière fut prêtée à la modélisation afin de fournir une expression complète et cohérente du système tout en tenant compte de la sensibilité due aux comportements des éléments constituant le procédé aux moindres perturbations.

La combinaison de l'élasticité et de l'inertie des matériaux utilisés dans les mécanismes contrôlés révèle des modes de vibration qui peuvent nuire à la précision du contrôle si ignorée. Pour remédier à ce fait, une attention importante fut prêtée à la mise détaillée en équations de la transmission flexible. La technique d'optimisation des régulateurs dans la loi de commande par les algorithmes génétiques a démontré des avantages en matière de précision et de fiabilité du contrôle envers les dynamiques des systèmes étudiés.

La tentative de donner aux problèmes liés à la répartition des charges de nouveaux aspects nous a conduit à exploiter des avantages tirés de l'usage des techniques de l'allocation de contrôle qui furent utilisées dans de diverses applications et surtout en aéronautique ; des stratégies de répartition des charges à base de techniques pseudo inverse et Daisy Chain ont été implémentées avec succès et utilisées pour la thématique de notre sujet. Les deux stratégies ont fait l'objet d'une évaluation comparative sous un aspect énergétique.

Nous avons pu rendre possible dans ce projet la conception d'une stratégie de répartition à base de la logique floue. Les avantages de cette dernière ont été utilisés et l'algorithme flou traduit un raisonnement humain et démontre certaines performances considérables. L'étude comparative entre un système multimoteurs et un entraînement monomoteur équivalent montre qu'un tel changement de procédé peut être rentable sur un plan d'efficacité énergétique à la seule condition que les puissances et les couples ne soient pas les seuls paramètres sur lesquels on se base pour choisir nos machines mais d'autres paramètres aussi tels que les coefficients des frictions, les inerties et les résistances. Ces derniers possèdent un impact important sur le bilan énergétique des systèmes d'entraînement.

On ne s'est pas limité dans le cadre de ce travail en une seule topologie multi machine, mais nous avons essayé d'introduire une autre configuration où la charge est placée au milieu des moteurs d'entraînement, ce qui représente un défi au niveau de la stabilité du système. Nous pouvons dire que la stratégie de commande ainsi que la technique suivie pour l'ajustement des paramètres des régulateurs permettent de garantir un comportement du système semblable à celui désiré.

La grandeur en question lorsqu'il s'agit de la répartition des charges était dans la majorité des travaux qui traitent le sujet le couple électromagnétique. Nous avons pu dans ce travail rendre possible le partage de la puissance requise par la charge entre les moteurs d'entraînement directement couplés en contrôlant les puissances utiles fournies par chacun de ces derniers; cela s'est rendu possible en utilisant la DPC.

Une autre contribution d'originalité qui été apportée dans ce travail, est de chercher au-delà de l'aspect dynamique de la répartition des charges; toutes les stratégies présentées

assurent un partage dynamique de la charge, nous avons proposé dans ce travail une technique de partage offline, basée sur les algorithmes génétiques et le comportement de la charge (courbe caractéristique et plage de variations) ainsi que les performances des moteurs disponibles pour l'entraînement. Cette technique peut générer les coefficients de partage pour chacune des machines selon les variations de la charge.

L'objectif essentiel de notre travail ainsi de celui de beaucoup de gens qui travaillent dans ce champs est l'efficacité énergétique dans les entraînements électriques. Nous avons pris l'approche des systèmes multimachines comme moyen pour l'atteindre. Cependant cela ne nous a pas empêché d'inspecter d'autres pistes; une des idées développées dans ce travail est d'optimiser les paramètres des régulateurs dans la loi de commande par des algorithmes génétiques afin d'assurer une meilleure optimisation de l'énergie consommée.

Pour travaux futurs, toutes les stratégies présentées dans ce travail feront l'objet d'une étude expérimentale, et seront adaptées et testées en simulation sur des systèmes réels (véhicules hybride et électrique, train, les excavateurs).

Une bonne étude de la répartition de la puissance exige essentiellement les cartographies (couple, vitesse, rendement) des moteurs d'entraînement. Établir une stratégie à base des algorithmes génétiques nécessite d'avoir un profil réel de la charge. De telles fiches techniques pourraient beaucoup aider à développer des algorithmes plus précis.

Références

- [1] V. E. Wagner, "Load Sharing in Dual Drive Conveyors," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. IA-20, pp. 1412-1417, 1984.
- [2] N. Zargari, G. Seggewiss, R. Turton, S. Rizzo, and W. Jahn, "Multiple medium voltage AC drives fed from a common AC bus for single or multi motor conveyor applications," in *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on*, 2005, pp. 9 pp.-P.9.
- [3] Jeftenic, x, B., Bebic, x, M., x030C, tatkcic, x, and S., "Controlled multi-motor drives," in *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006. International Symposium on*, 2006, pp. 1392-1398.
- [4] A. Umemura, Y. Saito, and T. Haneyoshi, "A study on the multi-motor for antagonistic hard braking," in *Electrical Machines and Systems, 2009. ICEMS 2009. International Conference on*, 2009, pp. 1-4.
- [5] C. A. Michael and A. N. Safacas, "Dynamic and Vibration Analysis of a Multimotor DC Drive System With Elastic Shafts Driving a Tissue Paper Machine," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, pp. 2033-2046, 2007.
- [6] O. Zirn and A. Fink, "Multidrive control for milling rotary tables with flexible reduction stages," in *Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2009. POWERENG '09. International Conference on*, 2009, pp. 402-407.
- [7] F. J. Perez-Pinal, "Improvement of the electronic line-shafting," in *Power Electronics Specialists Conference, 2004. PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual*, 2004, pp. 3260-3265 Vol.5.
- [8] M. Taniguchi, T. Yoshinaga, and M. Matsuse, "A Speed-Sensorless Vector Control of Parallel-Connected Multiple Induction Motor Drives with Adaptive Rotor Flux Observers," in *Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC '06. 37th IEEE*, 2006, pp. 1-5.
- [9] H. Baibanou, "Commande d'une charge mécanique programmable pour l'émulation de charges industrielles de moteur" Maitrise en génie électrique, génie électrique, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES, QC-Canada, 2003.
- [10] J.-P. H. Jean-Pierre Caron. Modelisation et commande de la machine synchrone [Online].
- [11] L. Dalila, "Commande Non Linéaire Adaptative D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents" Magistère, Faculté des Sciences de l'Ingénieur, Département d'ElectrotechniqueBATNA, Batna-ALGÉRIE, 2009.
- [12] A. Parviainen, "DESIGN OF AXIAL-FLUX PERMANENT-MAGNETLOW-SPEED MACHINES AND PERFORMANCECOMPARISON BETWEEN RADIAL-FLUX ANDAXIAL-FLUX MACHINES," Doctor of Science(Technology), Lappeenranta teknillinen yliopisto, Lappeenranta, Finland, Lappeenranta, Finland, 2005.

- [13] J. Ikäheimo, "Des moteurs à aimants permanents pour s'affranchir des réducteurs" in *Revue ABB* 4/2002, A. Oy, Ed., ed. Finlande.
- [14] M. Mekhiche, S. Nichols, J. L. Kirtley, J. Young, D. Boudreau, and R. Jodoin, "High-speed, high-power density PMSM drive for fuel cell powered HEV application," in *Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International*, 2001, pp. 658-663.
- [15] H. DOGAN, "Méthodologie de Conception des Machines Synchrones à Aimants Permanents— Application au Véhicule Electrique avec Chargeur Rapide Embarqué " Doctorat, l'École Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique & Traitement du signal Université DE Grenoble, France, 2013.
- [16] B. Boussad, "contribution à la modelisation des systemes couples machines convertisseurs: application aux machines à aimants permanents (BDCM-PMSM)," Doctorat, Faculté de génie électrique et d'informatique, Mouloud Maameri TIZI-OUZOU, 2012.
- [17] B. J. HEBERT, "Etude par simulation d'un system de positionnement par une machine synchrone à aimants permanents alimentée par courants imposés" Maîtrise, génie électrique, quebec à Trois-Rivières, QC-Canada, 1989.
- [18] T. TOUDJA, "Commande non linéaire robuste d'un moteur synchrone à aimant permanent," Magister en electrotechnique, Département de Génie Electrique, Laboratoire de Commande des Processus, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie, 2008.
- [19] R. P. EGUILUZ, "Commande algorithmique d'un système mono-onduleur bimachine asynchrone destiné à la traction ferroviaire," Doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Toulouse, Toulouse-France, 2002.
- [20] FAÏÇAL MNIF, "Étude et réalisation des lois de commande par mode de glissement et par approche géométrique: Application à un onduleur de tension monophasé," maîtrise, Génie électrique, Quebec à Trois-Rivières QC-Canada, 1991.
- [21] B. Amel, "Commande Prédictive Généralisée d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents," Magistère en Electrotechnique, Faculté des Science de l'Ingénieur, Département de l'électrotechnique Batna, Batna-Algérie, 2009.
- [22] G. Zhang and J. Furusho, "Speed control of two-inertia system by PI/PID control," in *Power Electronics and Drive Systems, 1999. PEDS '99. Proceedings of the IEEE 1999 International Conference on*, 1999, pp. 567-572 vol.1.
- [23] K. Szabat and T. Orłowska-Kowalska, "Vibration Suppression in a Two-Mass Drive System Using PI Speed Controller and Additional Feedbacks—Comparative Study," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 54, pp. 1193-1206, 2007.
- [24] V. Jan, B. Peter, M. Pavol, S. Marek, and V. Vladimir, "Control of flexible drive with PMSM employing forced dynamics," in *Power Electronics and Motion Control Conference, 2008. EPE-PEMC 2008. 13th*, 2008, pp. 2219-2226.
- [25] D. A. Kocabas, E. Salman, and A. K. Atalay, "Analysis using D-Q transformation of a drive system including load and two identical induction motors," in *Electric*

- Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*, 2011, pp. 1575-1578.
- [26] M. A. Pedrasa and V. L. S. Delfin, "Low Cost Mechanical Load Emulator," in *TENCON 2006. 2006 IEEE Region 10 Conference*, 2006, pp. 1-3.
 - [27] M. C. S. ALAOUI, "Commande et Observateur par Modes glissants d'un système de pompage et d'un bras manipulateur," doctorat, Faculté des sciences DES SCIENCES Dhar El Meharz FES, Laboratoire d'Electronique, Signaux-Systèmes et d'Informatique, Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fes, Maroc, 2009.
 - [28] K. Yamazaki, "Efficiency analysis of induction motors for ammonia compressors considering stray load losses caused by stator and rotor slot ripple," in *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE*, 2001, pp. 762-769 vol.2.
 - [29] C. Mademlis, I. Kioskeridis, and N. Margaris, "Optimal efficiency control strategy for interior permanent-magnet synchronous motor drives," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 19, pp. 715-723, 2004.
 - [30] L. Junggi, N. Kwanghee, C. Seoho, and K. Soonwoo, "A Lookup Table Based Loss Minimizing Control for FCEV Permanent Magnet Synchronous Motors," in *Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE*, 2007, pp. 175-179.
 - [31] K. Tae-Jin, K. Dae-Wook, L. Yo-Han, and H. Dong-seok, "The analysis of conduction and switching losses in multi-level inverter system," in *Power Electronics Specialists Conference, 2001. PESC. 2001 IEEE 32nd Annual*, 2001, pp. 1363-1368 vol. 3.
 - [32] L. Yu, A. Serrani, S. Yurkovich, D. B. Doman, and M. W. Oppenheimer, "Model predictive dynamic control allocation with actuator dynamics," in *American Control Conference, 2004. Proceedings of the 2004*, 2004, pp. 1695-1700 vol.2.
 - [33] D. T. Ahmed Khelassi, Philippe Weber. (2010) Synthèse d'une loi de commande reconfigurable assurant la fiabilité des systemes. *Sixième Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA 2010*.
 - [34] M. W. Oppenheimer, D. B. Doman, and M. A. Bolender, "Control Allocation for Over-actuated Systems," in *Control and Automation, 2006. MED '06. 14th Mediterranean Conference on*, 2006, pp. 1-6.
 - [35] H. CHAOUI, "Soft-Computing Based Intelligent Adaptive Control Design of Complex Dynamic Systems," Doctorat en génie électrique (PH.D.), Département de génie électrique et génie informatique, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, Québec, Canada, 2011.
 - [36] M. F. R. Lee and F. H. S. Chiu, "Intelligent multi-behavior control and coordination for the autonomous differential drive mobile robot," in *Fuzzy Theory and Its Applications (iFUZZY), 2013 International Conference on*, 2013, pp. 31-36.
 - [37] O. Zirn and A. Fink, "Master-Slave control for milling rotary tables with flexible reduction stages," in *Advanced Electromechanical Motion Systems & Electric*

Drives Joint Symposium, 2009. ELECTROMOTION 2009. 8th International Symposium on, 2009, pp. 1-6.

- [38] I. Takahashi and T. Noguchi, "A New Quick-Response and High-Efficiency Control Strategy of an Induction Motor," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. IA-22, pp. 820-827, 1986.
- [39] Z. Yongchang, Z. Jianguo, G. Youguang, X. Wei, W. Yi, and Z. Zhengming, "A sensorless DTC strategy of induction motor fed by three-level inverter based on discrete space vector modulation," in *Power Engineering Conference, 2009. AUPEC 2009. Australasian Universities*, 2009, pp. 1-6.

Annexe A – Articles scientifiques

Les articles scientifiques publiés sont présentés dans cette section.

[1] Bernia, Messaoud; Teiar, Hakim; Sicard, Pierre, "A modified pseudo inverse method for control allocation in electromechanical coupled systems," *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2015 IEEE 28th Canadian Conference on*, vol., no., pp.1140,1144, 3-6 May 2015 doi: 10.1109/CCECE.2015.7129435

[2] Bernia, Messaoud; Sicard, Pierre, "A hierarchical algorithm for load sharing in multi-machine multi-converter systems with flexible coupling," *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2015 IEEE 28th Canadian Conference on*, vol., no., pp.1151,1155, 3-6 May 2015 doi: 10.1109/CCECE.2015.7129437

A modified pseudo inverse method for control allocation in electromechanical coupled systems

Messaoud Bernia, Hakim Teiar, and Pierre Sicard

Groupe de Recherche en Électronique Industrielle

Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières (Québec), Canada

Email: {Messaoud.Bernia, Hakim.Teiar, Pierre.Sicard}@uqtr.ca

Abstract— In this paper, a load sharing strategy based on control allocation with a modified pseudo inverse method is developed and used to generate virtual control inputs for the actuators of a flexibly coupled multi-motor system. The performance of the control allocation algorithm is compared with that of equal distribution. By taking into consideration copper, iron, mechanical and inverter losses, the proposed strategy yields high efficient operation of the overall system, efficient energy utilization, and keeps the operation of the system in case of failure thanks to the cooperative work of the motors.

Keywords— Load sharing; Control allocation; PMSM; Flexible coupling; Pseudo inverse.

1. INTRODUCTION

Multi-motor systems are common in practice, e.g. in robots, web handling equipment and power systems, and are increasingly important with the proliferation of electrical and hybrid vehicles [1]-[2]. Associating multiple energy sources or motors on a common load raises stability, and power and effort sharing issues. Those systems offer multiple advantages such as: redundancy that allows the system to operate in derated mode in case of equipment failure, the possibility of improving vehicle stability (for in-wheel motors in electrical vehicles for instance) [3]-[4], reduction of constraints in the system (e.g. in conveyor) [5], to meet physical or economic constraints by using multiple smaller motors, and in some cases to reduce the overall energy consumption as compared to a single motor drive. Handling of multiple objectives and disturbances in modular and tightly coupled systems to obtain practical control structures is a challenge for applications that involve critical reliability.

In this paper, a novel load sharing technique based on a modified pseudo inverse system is proposed and used to produce virtual control inputs for the actuators in a coupled multi-motor system. The approach is compared to pseudo-inverse calculation which results into equal loading for the motors. By considering the losses in the system (copper, iron, mechanical and inverter) [6]-[7]-[8], the proposed technique improves the overall energy efficiency of the system.

II. DYNAMICS

The system studied as shown in Fig. 1 is composed of

three flexibly coupled permanent magnet synchronous motors that drive a common load (a Direct Current Motor in the test bed). Each motor is fed by a voltage source inverter. The main command input is the reference speed, this latter is compared with the load speed and the error signal is the input of the PI speed controller [9]. The output of the controller provides the total required torque T_{ext} (the desired virtual control) and is considered as the input of the dynamic control allocation algorithm, which task is to compute the desired actuator reference torque inputs [10]. Field orientation control (FOC) is used for generating the reference value of the quadrature current i_q , while maintaining direct current i_d to zero. i_d and i_q [11] currents are regulated by two separated PI controllers, where the outputs represent the desired dq voltages that are imposed by space vector pulse-width modulation [12].

Flexible coupling is commonly used to link multiple motor systems in industry. Interaction of the motors due to the flexible coupling may be modeled by the mutual interaction torque [13]:

$$\begin{cases} T_{em12} = F(\theta_2 - \theta_1) \\ T_{em21} = F(\theta_1 - \theta_2) \\ T_{em23} = F(\theta_3 - \theta_2) \\ T_{em32} = F(\theta_2 - \theta_3) \end{cases} \quad (1)$$

Where $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ are the rotor angles and F is the stiffness constant of the equivalent linear torsion springs [14]. The dynamic equations for the three machines become:

$$\begin{cases} J_1 \ddot{\theta}_1 = T_{em1} - J_1 \ddot{\theta}_3 + T_{em12} - T_{ext1} \\ J_2 \ddot{\theta}_2 = T_{em2} - J_2 \ddot{\theta}_2 + T_{em21} + T_{em23} - T_{ext2} \\ J_3 \ddot{\theta}_3 = T_{em3} - J_3 \ddot{\theta}_2 + T_{em32} - T_{ext3} \end{cases} \quad (2)$$

Where J_1, J_2 and J_3 are the inertias; T_{em1}, T_{em2} and T_{em3} are the electromagnetic torques; $\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2$ and $\ddot{\theta}_3$ are the speeds of the three motors; $\ddot{\theta}_1, \ddot{\theta}_2$ and $\ddot{\theta}_3$ are their accelerations; T_{ext1}, T_{ext2} and T_{ext3} are external torques [14].

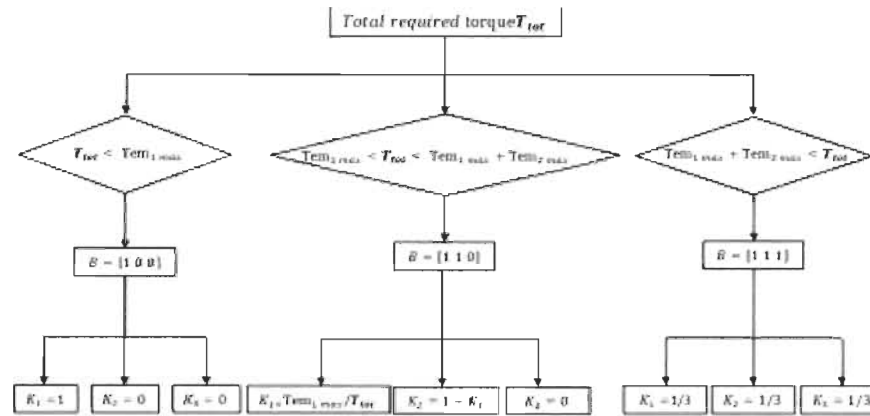


Fig.3. Quasi-optimal load sharing strategy

for higher torque demand, when each motor has to provide at least 2/3 of its nominal torque. The overall efficiency of the system is given by the equation:

$$\eta_{tot} = \frac{\eta_1 P_{e1} + \eta_2 P_{e2} + \eta_3 P_{e3}}{P_{e1} + P_{e2} + P_{e3}} \quad (6)$$

Where η_1, η_2 and η_3 are respectively the proper efficiency of the three motors (M_1, M_2 and M_3); P_{e1}, P_{e2} and P_{e3} are respectively the electrical powers of the three motors (M_1, M_2 and M_3). We note that

$$P_s = v_d i_d + v_q i_q \quad (7)$$

V. SIMULATION

The two load sharing strategies were applied to our system of three identical 1.5 kW-1000 RPM 2 pole pairs interior magnet PMSM which parameters are given in Table 1. The strategies were simulated under the same conditions using MATLAB/Simulink™. The model includes inverter losses and the complete

control system presented in Fig. 1. A speed reference of 1000RPM is used and a load torque $T = 18N \cdot m$ is introduced at time $t \approx 3.5s$, to test the behavior and performance of the system under both methods (Fig. 4 to 13).

TABLE 1. MACHINE PARAMETERS SIMULATION

Parameters	Values
Rated power	$P_n = 1.5 \text{ kW}$
Rated Torque	$T_n = 10 \text{ N} \cdot \text{m}$
Rated Speed	$\omega_n = 1000 \text{ RPM}$
d-axis inductance	$L_d = 44.8 \text{ mH}$
q-axis inductance	$L_q = 102.7 \text{ mH}$
Stator Resistance	$R = 5.8 \Omega$
Flux linkage	$\lambda = 0.533 \text{ Wb}$
Viscous friction coefficient	$F_v = 0.0005 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$
Inertia	$J = 0.0033 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$
Number of pole pairs	$p = 2$

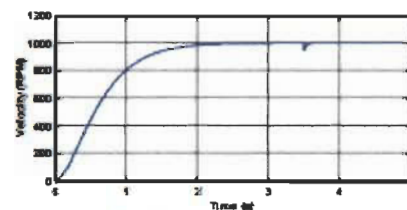


Fig.4. Load speed (Equal load sharing)

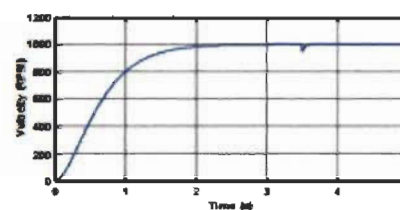


Fig.5. Load speed (quasi-optimal load sharing)

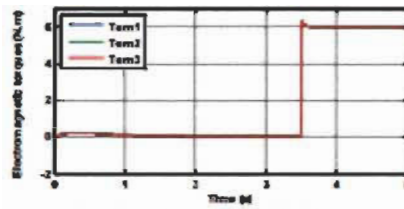


Fig. 6. Torque characteristics (equal load sharing)

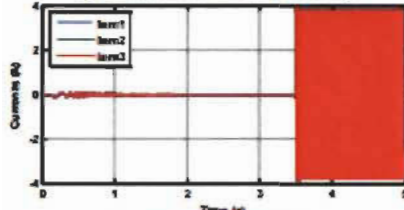


Fig. 7. Currents (equal load sharing)

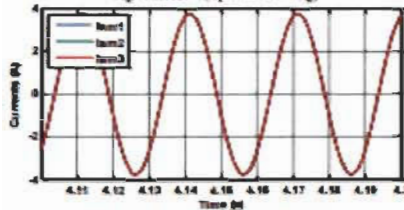


Fig. 8. Zoom of currents (equal load sharing)

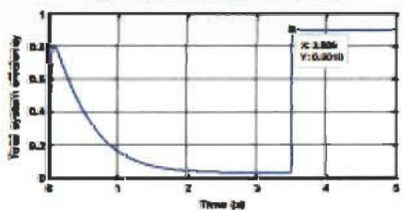


Fig. 9. Total system efficiency (equal load sharing)

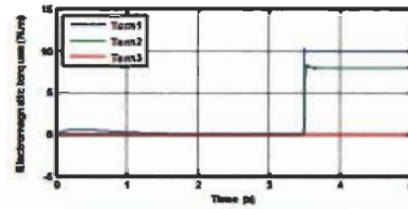


Fig. 10. Torque characteristics (quasi-optimal load sharing)

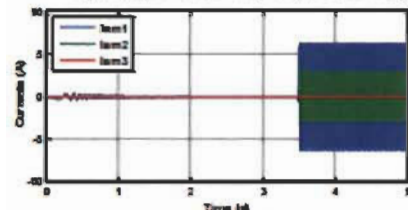


Fig. 11. Currents (quasi-optimal load sharing)

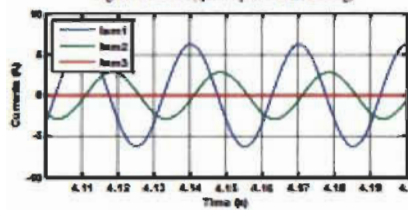


Fig. 12. Zoom of currents (quasi-optimal load sharing)

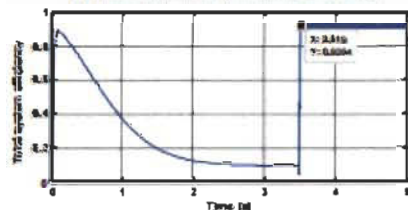


Fig. 13. Total system efficiency (quasi-optimal load sharing)

VI. DISCUSSION

The simulation results highlight the difference in the behavior of the system under the two methods. Figures 4 and 5 show that load speeds are very similar for both strategies. Figures 6 and 10 show the difference between the torque characteristics in the two cases. The three motor torques in the first method are identical (equal distribution) and the currents of the three machines in equal load sharing are identical (Fig. 7 and 8) since the motors are identical in the model. With the second strategy, only the first motor is used at start-up, and under loading condition, M_1 provides its nominal torque equal to 10 N.m, M_2 provides $T_{em2} = 8 \text{ N} \cdot \text{m}$,

while M_3 reference is zero torque. The motor currents in the quasi-optimal load sharing differ in amplitude and in phase (Fig. 11 and 12). We can interpret this case by $k_3 = 0$, and $k_1 > k_2$. Fig. 9 and 13 also show that the instantaneous efficiency of the system with the quasi-optimal distribution is higher than the equi-distribution during transients and in steady state. The quasi-optimal load sharing provides an overall system efficiency of 92%, which is better than that obtained by the equi-distribution, 90% (Fig. 9 and 13).

VII. CONCLUSION

This paper presents loading strategies for a flexibly coupled multi-motor system. Simulation results show that the quasi-optimal load sharing algorithm, while maintaining simplicity of implementation, outperforms the equi-distribution strategy. It guarantees a better performance of the system, and it can give some flexibility to the dynamics of the system by the possibility of limiting the use of an actuator.

References

- [1] Bouscayrol, A., et al., *Weighted Control of Traction Drives With Parallel-Connected AC Machines*, *Industrial Electronics*, IEEE Transactions on, 2006, 53(6): p. 1799-1806.
- [2] Allé, et al., *Different energy management strategies of Hybrid Energy Storage System (HESS) using batteries and supercapacitors for vehicular applications*, in *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010 IEEE, 2010.
- [3] Sun, A., et al., *A Novel Four Axes Vector-Controlled Dual-Rotor PMSM for Plug-in Electric Vehicles*, *Industrial Electronics*, IEEE Transactions on, 2015, PP(99): p. 1-1.
- [4] Mese, E., et al., *Investigating Operating Modes and Converter Options of Dual Winding Permanent Magnet Synchronous Machines for Hybrid Electric Vehicles*, *Energy Conversion*, IEEE Transactions on, 2014, PP(99): p. 1-11.
- [5] Ristic, L.B., et al., *Fuzzy speed control of belt conveyor system to improve energy efficiency*, in *Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC)*, 2012 15th International, 2012.
- [6] Kowalski, T., et al., *Energy-Efficient Control Strategy for PMSM With Superconductive Stator Winding*, *Applied Superconductivity*, IEEE Transactions on, 2015, 25(3): p. 1-6.
- [7] Rahab, A., et al., *Losses minimization of wind conversion chain using inverter by DTC-SVM*, in *Renewable Energy Congress (IREC)*, 2014 5th International, 2014.
- [8] Spina, I., et al., *Comparative analysis of performance and energy losses in light railways vehicles equipped with IM or PMSM drive*, in *Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2014 International Symposium on, 2014.
- [9] Bosar, M.S., et al., *Comparison of sensorless FOC and SVM-DTFC of PMSM for low-speed applications*, in *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 2013 Fourth International Conference on, 2013.
- [10] Uhlen, K., et al., *Coordination of actuators for an A-double heavy vehicle combination using control allocation*, in *Intelligent Transportation Systems (ITS)*, 2014 IEEE 17th International Conference on, 2014.
- [11] Niu, L., et al., *A comparative study of model predictive current control and FOC for PMSM*, in *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2014 17th International Conference on, 2014.
- [12] Choudhury, A., P. Pillay, and S.S. Williamson, *A performance comparison study of space-vector and carrier-based PWM techniques for a 3-level neutral point clamped (NPC) traction inverter drive*, in *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDS)*, 2014 IEEE International Conference on, 2014.
- [13] Vittek, J., et al., *Forced dynamics position control of the drive with linear PMSM and flexible coupling*, in *Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON)*, 2010 IEEE Region 8 International Conference on, 2010.
- [14] Vittek, J., et al., *Comparison of sliding mode and forced dynamics control of electric drive with a flexible coupling employing PMSM*, in *Industrial Technology, 2008. ICIT 2008. IEEE International Conference on*, 2008.
- [15] Xiong, L., Y. Chen, and C. Jin, *A nonlinear control allocation algorithm for DFC in distributed-motor drive electric vehicles using S-QP*, in *Control and Decision Conference (2014 CCDC)*, The 26th Chinese, 2014.
- [16] Jiyeon, K., Y. Inseok, and L. Dangik, *Accommodation of actuator faults using control allocation with modified duty charring*, in *Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 2011 11th International Conference on, 2011.
- [17] Naskar, A.K., S. Patra, and S. Sen, *Reconfigurable Direct Allocation for Multiple Actuator Failures*, *Control Systems Technology*, IEEE Transactions on, 2015, 23(1): p. 397-405.

A hierarchical algorithm for load sharing in Multi-machine Multi-converter Systems with flexible coupling

Messaoud Bernia and Pierre Sicard

Groupe de Recherche en Electronique Industrielle
Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières (Québec), Canada
Email: {Messaoud.Bernia, Pierre.Sicard}@uqtr.ca

Abstract— In this paper, a dynamic algorithm for load sharing in multi-machine systems is proposed based on a principle of hierarchical operation of the motors. The motors share the load cooperatively according to the load variations and their power rating in order to save energy and optimize the performance of the drive system and the motors. The proposed algorithm demonstrates superiority in optimizing the drive system performance, and provides a significant saving of energy consumption and minimizing losses as compared to equal torque sharing.

Keywords— PMSM; multi-motor; load sharing; efficiency improvement; energy saving.

I. INTRODUCTION

Electrical power was the most important component to revolutionize the industry and modern life. During decades, an objective was to develop and expand the use of electricity in almost all manufacturing and domestic applications. Due to the high cost of energy and its impact on profitability, research has been focused on the optimization of energy consumption [1]. Following this new tendency, electric drives have been greatly developed and motors have peaked close to their maximum efficiencies. Improvements are still possible by searching new strategies to save energy in electric drives [2]. Replacement of conventional single motor drives with multi-motor drives coupled with a load sharing strategy is a potential mean to reduce energy consumption, losses, and improve global efficiency. This approach is adopted in this paper.

II. LOAD SHARING IN MULTI-DRIVE SYSTEMS

Multi-motor systems describe a process known in the industry in applications that require more than one motor and where the motors contribute in a cooperative way to drive the load. These systems are used on a large scale especially with the proliferation of electrical and hybrid vehicles [3].

An equivalent multi-motor system can replace the single motor that is used in many applications to drive a load. The majority of load sharing and control allocation algorithms generate reference signals to the actuators directly related to the overall control input [4]-[5], which creates some instability especially with sudden load changes. The proposed algorithm provides operation rate parameters which are percentages of the maximum electromagnetic torque of each motor. The proposed load sharing strategy is based on a hierarchical operation of the machines to distribute the required torque in a more optimal way between motors. Only the first motor is used at start-up and then the other motors are turned on following the load requirement; once the first motor reaches its maximum torque, the second is turned on and both motors drive the load cooperatively. This mechanism allows the motors to operate within their nominal ranges, and reduce operation with reduced loading conditions.

The multi-machine system is modeled in details, including flexible couplings [6]-[7] to manage the constraints due to the complexity of the system and give more robustness to the control law and the drive system, especially that the machines used are not identical and have different characteristics. The control parameters of the control law are optimized by a genetic algorithm to ensure greater robustness of the drive system.

III. SYSTEM CONFIGURATION

In order to test the proposed strategy performance, the studied system was tested in simulation by emulating the load profile imposed by a centrifugal pump [8]. The drive system is composed of three non-identical flexibly coupled permanent magnet synchronous motors [9] sharing a common load (the centrifugal pump). Every motor is fed by a voltage source inverter. The proposed algorithm generates the electromagnetic torque references, which are the control inputs of the motor controllers. Given that the motors are mechanically coupled, the speed control is performed at the load shaft.

The output of the speed controller provides the total required torque T_{tot} (the desired virtual control) [10] and is considered as the input of the proposed load sharing algorithm. Field oriented control is used as a control law for the control of motors [11] and the control voltages are generated by space vector pulse-width modulation [12].



Fig.1 Physical representation of the system

IV. CONTROL LAW PARAMETER OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHM

The operation of the genetic algorithms is inspired by the natural principle of survival of the fittest. The optimization process begins with the random generation of a population that consists of a set of chromosomes. Once a random population is obtained, the solution represented by each channel should be evaluated; the objective function is responsible for the evaluation of the solution at each step [13].

To ensure the most effective control law, controller parameters are optimized by a genetic algorithm according to the following objective function:

$$Fitness = \int_0^t |e| dt \quad (1)$$

Figure 2 depicts the flowchart of the parameter optimizing procedure using GA.



Fig.2 Parameters optimizing procedure

V. EFFICIENCY CALCULATION

The overall efficiency of a multi-motor system is given by the equation:

$$\eta_{tot} = \frac{\eta_1 P_{e1} + \eta_2 P_{e2} + \eta_n P_{en}}{P_{e1} + P_{e2} + P_{en}} \quad (2)$$

Where η_1 , η_2 and η_n are respectively the proper efficiency of the motors (M_1 , M_2 and M_n); P_{e1} , P_{e2} and P_{en} are respectively the electrical powers of the motors (M_1 , M_2 and M_n). We note that

$$P_s = v_d i_d + v_q i_q \quad (3)$$

$$\eta_n = \frac{P_{elm} - (P_{acc} + i_{fr})}{P_{elm} + (\sum L_j + L_{iron} + L_i)} \quad (4)$$

Where P_{elm} , P_{acc} and i_{fr} are respectively the electromagnetic power, the acceleration power for motor inertia and the motor friction losses; L_j , L_{iron} , and L_i are respectively the joule, iron and inverter losses (Fig. 3).

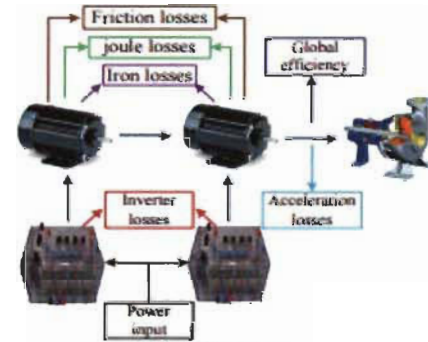


Fig.3 Depiction of system losses

VI. LOAD SHARING STRATEGY

The proposed algorithm is designed to calculate the percentage by which the motors must contribute by generating operating rate parameters [14] that correspond to percentages of maximum torques of each motor, with respect to the constraint $\sum_{k=1}^n k_i = 1$.

The first motor is used for the startup and the second is not activated until the first reaches its maximum torque, then the first continues to provide its maximum torque and the second motor supplies the rest of the required torque.

The proposed strategy is based on the consideration of the performance of each machine, namely the torque limits of each motor. Unlike the hierarchical load sharing techniques (daisy chain), the operation rate parameters do not act directly on the control input (i_{em}), which represents the total required torque, but calculates the command inputs of the motors by generating operation

rate parameters, which are percentages of the maximum torque of each motor, not of the total required torque by the following equations:

$$\begin{cases} tem_1^* = k_1 tem_{1max} \\ tem_2^* = k_2 tem_{2max} \\ tem_3^* = k_3 tem_{3max} \end{cases} \quad (5)$$

VII. TESTS AND SIMULATION

Equal torque sharing and the proposed load sharing strategy are applied to the system of three non-identical PMSMs, which parameters are given in Table I, and simulated under the same conditions using MATLAB®-Simulink™. The model includes inverter losses and the complete control system. The same load profile of a centrifugal pump (Fig. 4) is applied in both cases to evaluate their behavior in different operating ranges. A variable speed profile over time is imposed to distinguish clearly the operating ranges (Fig. 5 and 6). Simulation results are shown on Fig. 7 to 19.

TABLE I MACHINES PARAMETERS

Parameters	M1	M2	M3
Rated power (kw)	1.5	1.1	1.3
Rated Torque (N.m)	6	4.1	3
Inductance in d-axis (H)	5.97e-3	25.02e-3	4e-3
Inductance in q-axis (H)	5.974e-3	40.17e-3	4.5e-3
Stator Resistance (Ω)	0.78	6.2	0.57
Flux linkage (Wb)	0.148	0.305	0.064
Friction coefficient (N.m.s)	5e-5	0.0011	0.0039
Inertia (kg.m ²)	4.89e-4	0.0036	0.0208
Number of pole pairs	3	3	2

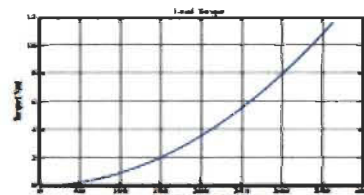


Fig. 4. Load profile.

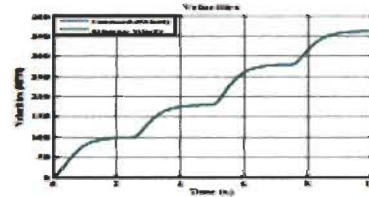


Fig. 5. Load velocity (optimal sharing).

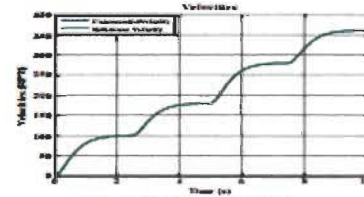


Fig. 6. Load velocity (equal torque).

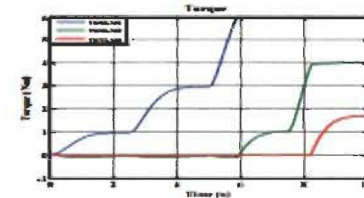


Fig. 7. Electromagnetic torques (optimal sharing).

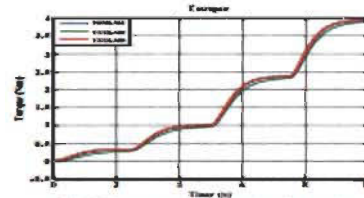


Fig. 8. Electromagnetic torques (equal torque).

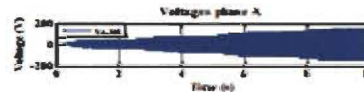


Fig. 9. Voltages phase A (optimal sharing).



Fig. 9. Voltages phase A (optimal sharing).

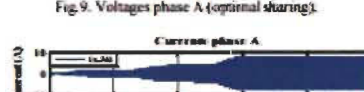


Fig. 10. Currents phase A (optimal sharing).

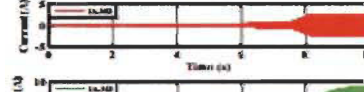


Fig. 10. Currents phase A (optimal sharing).

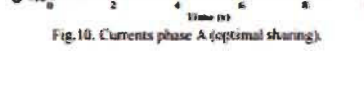


Fig. 10. Currents phase A (optimal sharing).

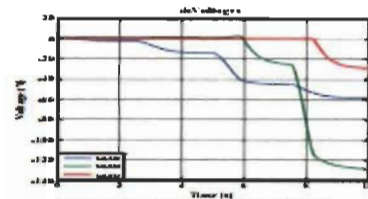


Fig.11. Voltages on d axis (optimal sharing).

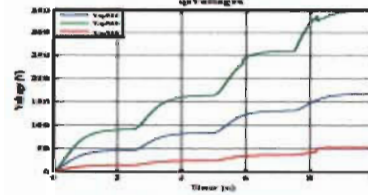


Fig.12. Voltages on q axis (optimal sharing).

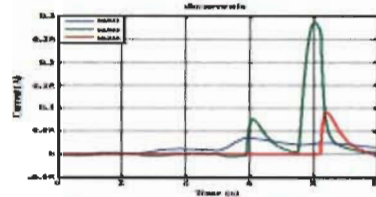


Fig.13. Currents on d axis (optimal sharing).

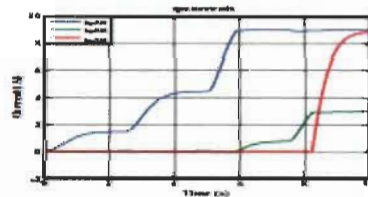


Fig.14. Currents on q axis (optimal sharing).

VIII. DISCUSSION

The simulation results highlight the difference in the behavior of the system under the two methods. Figures 5 and 6 show that load speeds are very similar for both strategies.

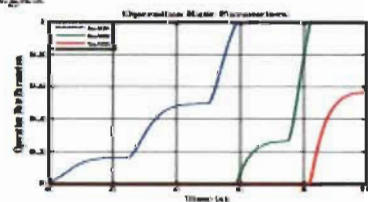


Fig.15. Operation rate parameters (optimal sharing).

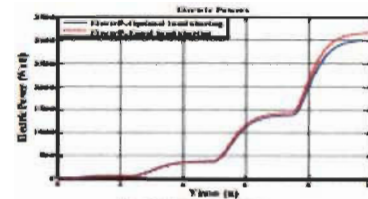


Fig.16. Electric powers.

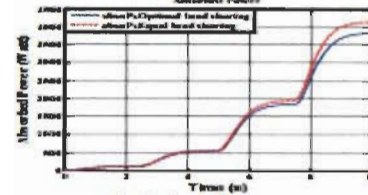


Fig.17. Absorbed powers.

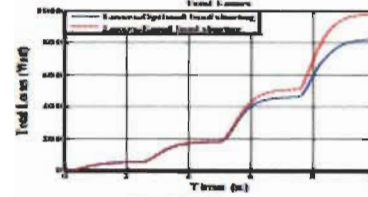


Fig.18. Total losses.

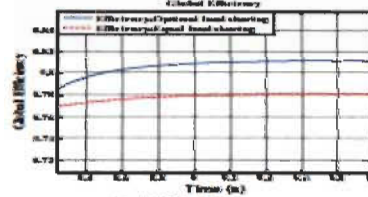


Fig.19. Global efficiency.

Figures 7 and 8 show the difference between the torque characteristics in the two cases. The three motor torques in the first method are identical, (equal distribution); the small heterogeneity is explained physically by the flexible coupling between the motors and the individual controllers performance. With the optimal sharing strategy, only the first motor is used at start-up, and under loading condition, M1 provides its nominal torque equal to $6 \text{ N} \cdot \text{m}$, M2 provides $T_{em2} = 4 \text{ N} \cdot \text{m}$, while M3 reference is $1.9 \text{ N} \cdot \text{m}$. The motor currents in the optimal load sharing differ in amplitude and in phase (Fig. 10). We can interpret this case by $k_1 > k_2 > k_3$. Fig. 19 also shows that the instantaneous efficiency of the system with the optimal distribution is higher than the equal distribution.

Figures 17 and 18 show the power absorbed by the system to drive the load and the sum of the losses taken into account (copper, iron, mechanical and inverter losses) under both strategies. The optimal load sharing strategy allows a significant minimization of losses in the system under loaded condition. As a result, the optimal load sharing provides an overall system efficiency of 81%, which is better than that obtained by the equi-distribution, 78% (Fig. 19).

IX. CONCLUSION

In this paper, a load sharing strategy is proposed and compared to equal-torque sharing for a multi drive system including flexible couplings, in a pumping application. In addition, genetic algorithm is used to tune the controllers for robustness. The simulation results clearly show the performance achieved by the proposed strategy in terms of drive system efficiency improvement, minimizing the energy consumed, total losses and absorbed power.

REFERENCES

- [1] Giannoutsos, S.V. and S.N. Manias, *A Data-Driven Process Controller for Energy-Efficient Variable-Speed Pump Operation in the Central Cooling Water System of Marine Vessels*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2015, 62(1): p. 587-598.
- [2] Yang, H., et al., *Electric Vehicle Route Optimization Considering Time-of-Use Electricity Price by Learnable Partheno-Genetic Algorithm*, Smart Grid, IEEE Transactions on, 2015, 6(2): p. 657-666.
- [3] Sigmond, D., A. Lohner, and M. Boh, *Simulation-based development of an energy-management-system for a drive train of a parallel hybrid electric vehicle*, in *Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC)*, 2014 16th International, 2014.
- [4] Rui, Z. and Z. Chengning, *Control allocation in the dynamic control of an eight in-wheel motored vehicle*, in *Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, 2014 IEEE Conference and Expo, 2014.
- [5] Coedinet, S., et al., *Torque Setpoint Tracking for Parallel Hybrid Electric Vehicles Using Dynamic Input Allocation*, Control Systems Technology, IEEE Transactions on, 2014, 22(5): p. 2007-2015.
- [6] Taheri, F. and B. Esmailinejad Moghadam, *Speed control of servo drives with a flexible couplings using fractional order state feedback*, in *Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC)*, 2014 5th, 2014.
- [7] Vittek, J., et al., *Forced dynamics position control algorithm for drives with flexible coupling including damping*, in *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2012 13th International Conference on, 2012.
- [8] Young-Jin, K., L.K. Norford, and J.L. Kirtley, *Modeling and Analysis of a Variable Speed Heat Pump for Frequency Regulation Through Direct Load Control*, Power Systems, IEEE Transactions on, 2015, 30(1): p. 397-408.
- [9] Harris, M., M.K. Pathak, and P. Agarwal, *Comparison of SPWM multilevel inverter fed PMSM drive with new level inverter fed drive*, in *Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*, 2014, 2014.
- [10] Qiwei, X., et al., *Research on intelligence torque control for the electrical variable transmission used in hybrid electrical vehicle*, in *Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2011 International Conference on, 2011.
- [11] Basar, M.S., et al., *Comparison of sensorless FOC and SVM-DTFC of PMSM for low-speed applications*, in *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG)*, 2013 Fourth International Conference on, 2013.
- [12] Krishnan, G. and K.T. Ajmal, *A heuristic method based on PWM ON PWM scheme with buck converter for torque ripple minimization in BLDC drive*, in *Emerging Research Areas: Magnetica, Machines and Drives (AICERAMMD)*, 2014 Annual International Conference on, 2014.
- [13] Khan, A.A. and O.A. Mohammed, *Parameter optimization for sensorless position and speed control of permanent magnet motor at low speed using genetic algorithm*, in *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE '09. IEEE/PES 2009*.
- [14] Atri, A., et al., *A speed sensorless field oriented control of parallel-connected dual PMSM*, in *Control Systems, Computing and Engineering (ICCSCE)*, 2011 IEEE International Conference on, 2011.